

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství**

**Analýza zvukového signálu pomocí programu Matlab**

**Analysis of Audio Signals using the Matlab**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Lucie Monsportová, DiS**  
Studijní program: N2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 3901T009 Biomedicínské inženýrství  
Téma: **Analýza zvukového signálu pomocí programu Matlab**  
**Analysis of Audio Signals using the Matlab**

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je zpracování audiosignálů pomocí prostředků prostředí Matlab se zaměřením na nf zvuk a vyhodnocení záznamů.

Body zadání:

1. Vyšetření možností využití prostředků pro analýzu audiosignálů v prostředí Matlab a jeho nástaveb.
2. Vytvoření grafického uživatelského rozhraní (GUI) pro zpracování nahrávek zvukových signálů se zaměřením na nízké kmitočty.
3. Zpracování základních charakteristik využívaných při analýze audiosignálů v prostředí Matlab (např. tonální analýzu pomocí FFT, periodicitu, ostrost, atd.).
4. Analýza reálných zvukových záznamů a popis získaných charakteristik signálů.
5. Provedení posouzení vlastností analyzovaných signálů vzhledem k možným fyzickým i psychickým účinkům na člověka na základě zjištěných informací.
6. Zhodnocení dosažených výsledků práce.

Seznam doporučené odborné literatury:

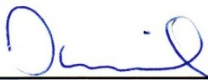
- [1] ROCHESSO, Davide. *Introduction to Sound Processing*. Dostupné z:  
<http://profs.sci.univr.it/~rochess/SP/sp.pdf>  
[2] MCLOUGHLIN, Ian. *Applied Speech and Audio Processing: With Matlab Examples*. New York :  
Cambridge University Press, 2009. ISBN 978-0-521-51954-0. Dostupné také z:  
[http://longfiles.com/his1j4nlzyxt/0521519543\\_SpeechProc.pdf.html](http://longfiles.com/his1j4nlzyxt/0521519543_SpeechProc.pdf.html)

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Richard Velička, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2015

  
doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně. Uvedla jsem všechny literární  
prameny a publikace, ze kterých jsem čerpala.“

V Ostravě .....7.5.2015.....

.....Monsportová.....  
podpis

Ráda bych zde poděkovala Ing. Richardu Veličkovi, Ph.D., vedoucímu mé diplomové práce, za odborné vedení, věcné připomínky a rady, které mi během psaní této práce poskytl. Mé poděkování dále patří Národní referenční laboratoři pro komunální hluk v Ústí nad Orlicí, jmenovitě Ing. Pavlu Junkovi, za jeho vstřícnost, cenné rady a poskytnutí podkladů pro realizaci této práce.

## **Abstrakt**

Tato práce je zaměřena na problematiku zpracování a hodnocení zvukových signálů nízkofrekvenčních a infrazvukových. Cílem je vytvoření grafického uživatelského rozhraní s využitím programu Matlab, jehož prostřednictvím lze analyzovat audio signály uložené ve formátu WAVE. Nástroje pro analýzu zahrnují metody pro rozbor signálu v časové oblasti, ve frekvenční oblasti i kombinaci obou. Kromě uvedených metod pro analýzu je možné provést přehrávání zvukových záznamů nebo jejich filtraci. V rámci realizace grafického prostředí jsou využity již integrované metody Matlabu nebo jednotlivé dostupné funkce, z nichž je vytvořen algoritmus požadované metody. Na základě zjištěných údajů lze program Matlab považovat za vhodný prostředek pro vizualizaci a analýzu zvukových signálů.

## **Klíčová slova**

Infrazvuk, nízkofrekvenční zvuk, mikrofon, hluk, spektrum, Matlab, analýza.

## **Abstract**

This thesis is focused on processing and evaluating of infrasound and low frequency sound signals. The aim is to create graphical user interface using Matlab through which one can analyze audio signals stored in WAVE format. Analysis tools include methods for the signal analysis in the time domain, in frequency domain and combination of both. In addition to these methods for analysis is possible to done play audio recordings or filtering. Within the implementation of graphical environment are used integrated methods of Matlab or individual available functions, which make up the algorithm of required method. Based on the findings the Matlab can be considered as a suitable tool for visualization and analysis of audio signals.

## **Key Words**

Infrasound, low-frequency sound, microphone, noise, spectrum, Matlab, analysis.

## Seznam použitých zkratk

ANSI	American National Standards Institute (americká standardizační organizace)
ASA	Acoustical Society of America (americká akustická společnost)
ČSN	Česká technická norma
ČSN EN	Harmonizovaná česká technická norma (EN – European Standard)
DFT	Discrete Fourier Transform (diskrétní Fourierova transformace)
DR	Dynamic Range (dynamický rozsah)
EEG	Elektroencefalografie
FFT	Fast Fourier Transform (rychlá Fourierova transformace)
FT	Fourier Transform (Fourierova transformace)
GUI	Graphical User Interfaces (grafické uživatelské rozhraní)
IEC	International Electrotechnical Commission (mezinárodní elektrotechnická komise)
ISO	International Organization for Standardization (mezinárodní technické normy)
RMS	Root Mean Square (efektivní hodnota)
SEL	Sound Exposure Level (hladina zvukové expozice)
SNR	Signal to Noise Ratio (poměr užitečného signálu k šumu)
STFT	Short Time Fourier Transform (krátkodobá Fourierova transformace)
THD	Total Harmonic Distortion (celkové harmonické zkreslení)
WT	Wavelet Transformation (waveletová neboli vlnková transformace)

## Seznam použitých symbolů

$A \text{ (m}^2\text{)}$	plocha kondenzátoru (elektrostatického mikrofonu kondenzátorového)
$B \text{ (-)}$	šířka propustného pásma v 1/3 oktávovém pásmu
$C_m \text{ (F)}$	kapacita mikrofonu
$c \text{ (m.s}^{-1}\text{)}$	rychlost zvuku ve vzduchu
$d \text{ (m)}$	vzdálenost mezi deskami kondenzátoru
$\epsilon_0 \text{ (F.m}^{-1}\text{)}$	permitivita vakua $8,854187818 \times 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$
$\Delta f \text{ (Hz)}$	frekvenční krok ve spektru
$F \text{ (0,125 s)}$	časová váhová charakteristika Fast
$f \text{ (Hz)}$	frekvence zvuku
$f_m \text{ (Hz)}$	střední frekvence v 1/3 oktávovém pásmu
$f_r \text{ (Hz)}$	referenční frekvence pro návrh 1/3 oktávových filtrů
$f_{max} \text{ (Hz)}$	maximální frekvence
$f_{vz} \text{ (Hz)}$	vzorkovací frekvence
$G \text{ (dB)}$	napěťové zesílení kombinace mikrofonu a předzesilovače
$K_{faktor}$	korekční faktor kalibrace mikrofonu a předzesilovače

$K_T$ (dB)	korekční hodnota pro přípustný expoziční limit
$\xi$ (s)	pomocná proměnná časové integrace
$L_{AE}$ (dB)	hladina zvukové expozice
$L_{AN}$ (dB)	distribuční hladiny
$L_{Aeq,T}$ (dB)	ekvivalentní hladina akustického tlaku A
$L_{dvn}$ (dB)	dlouhodobá průměrná ekvivalentní hladina (den-večer-noc)
$L_{eq}$ (dB)	ekvivalentní hladina akustického tlaku
$L_{eq}$ (dB)	ekvivalentní hladina akustického tlaku
$L_{GeqT}$ (dB)	ekvivalentní hladina akustického tlaku s váhovou funkcí G
$L_{G\tau}$ (dB)	časově vážená hladina akustického tlaku s váhovou funkcí G
$L_p$ (dB)	okamžitá hladina akustického tlaku
$L_{pAmax}$ (dB)	maximální hladina akustického tlaku A
$\lambda$ (m)	vlnová délka zvuku
$p_0$ (20 $\mu$ Pa)	referenční akustický tlak
$p_a$ (Pa)	naměřený akustický tlak nebo také minimální hodnota akustického tlaku
$p_G$ (Pa)	okamžitý akustický tlak vážený funkcí G
$S$ (1 s)	časová váhová charakteristika Slow
$S_c$ (dB, V/Pa)	celková citlivost kombinace mikrofonu a předzesilovače
$S_o$ (dB, V/Pa)	citlivost mikrofonu (nezatíženého)
$\sigma^2$	rozptyl hodnot vektoru dat (v jednotkách signálu na druhou)
$\tau$ (s)	exponenciální časová konstanta časové charakteristiky (F, S)
$T$ (min)	délka pracovní směny
$T$ (s)	časový interval průměrování
$T_{vz}$ (Hz)	vzorkovací perioda
$\mu$	střední hodnota vektoru dat (v jednotkách vstupního signálu)
$u_o$ (V)	výstupní napěťový signál z mikrofonu
$u_s$ (V)	šumové napětí na výstupu mikrofonu

## Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod .....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Infrazvuk a nízkofrekvenční zvuk .....</b>	<b>3</b>
2.1	Charakteristika a šíření infrazvukového a nízkofrekvenčního vlnění .....	3
2.2	Měření infrazvuku a nízkofrekvenčního zvuku .....	5
<b>3</b>	<b>Vliv zvuků s obsahem nízkých frekvencí na lidský organismus .....</b>	<b>17</b>
3.1	Kritéria hodnocení expozice zvuku .....	17
3.2	Ovlivnění fyzického a psychického stavu exponovaných osob .....	18
3.3	Expoziční limity pro infrazvuky a nízkofrekvenční zvuky .....	20
<b>4</b>	<b>Zvukový signál a jeho zpracování.....</b>	<b>23</b>
4.1	Digitalizace zvukového signálu .....	24
4.2	Přístup ke zpracování zvukového signálu .....	26
<b>5</b>	<b>Možnosti programu Matlab při zpracování audiosignálů.....</b>	<b>28</b>
5.1	Manipulace s audio daty uloženými ve formátu WAVE.....	29
5.2	Knihovna funkcí - Signal Processing Toolbox .....	30
5.2.1	Návrh, implementace a analýza filtrů .....	31
5.2.2	Spektrální analýza .....	32
5.2.3	Cepstrální analýza .....	36
5.2.4	Statistické zpracování signálů.....	36
<b>6</b>	<b>Analýza audiosignálů prostřednictvím programu Matlab .....</b>	<b>40</b>
6.1	Návrh grafického prostředí pro zpracování audiozáznamů .....	41
6.1.1	Naprogramované metody zpracování zvukových signálů.....	41
6.2	Rozbor audiozáznamů a vyhodnocení zjištěných výsledků .....	48
<b>7</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>73</b>
<b>8</b>	<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>75</b>
<b>9</b>	<b>Seznam příloh.....</b>	<b>81</b>



# 1 Úvod

Hlavním cílem této diplomové práce je vytvořit grafické uživatelské rozhraní, jehož prostřednictvím lze analyzovat audiosignály se zaměřením na nízkofrekvenční zvuky a infrazvuky. Pro praktickou realizaci rozhraní je využito programové prostředí Matlab, které představuje výkonný matematický nástroj. Úkolem je také vyšetřit možnosti využití tohoto programu právě pro zpracování zvukových signálů, tj. prozkoumání a uvedení hlavních implementovaných metod. Součástí praktické části je také vlastní analýza reálných zvukových záznamů, popis získaných charakteristik a následně jejich zhodnocení z hlediska možných účinků na lidský organismus.

Problematika nízkofrekvenčních zvuků a také infrazvuků je v současné době stále více diskutovaným tématem. Již řadu let jsou prováděny výzkumy a průzkumy se zaměřením na tuto problematiku, jejichž smyslem je odhalit a prokázat možný vliv těchto zvuků na psychický či fyzický stav člověka.

Tato práce je členěna do několika hlavních kapitol a podkapitol, přičemž počáteční kapitola je zaměřena na obecnější popis vlastností nízkofrekvenčních zvuků a infrazvuků a způsob jejich měření. Následující kapitola je věnována možným vlivům daných typů zvuku na lidský organismus. V další kapitole je obsažena základní charakteristika zvukového signálu a také jeho zpracování, tj. převod do digitalizované podoby. Následné kapitoly jsou již věnovány popisu dostupných metod a funkcí Matlabu a především návrhu grafického uživatelského rozhraní, včetně popisu naprogramovaných metod. V závěrečné kapitole je proveden popis dílčích výsledků analýzy audiozáznamů a jejich celkové vyhodnocení.

## 2 Infrazvuk a nízkofrekvenční zvuk

### 2.1 Charakteristika a šíření infrazvukového a nízkofrekvenčního vlnění

Zvukem komplexně, tedy i infrazvukem, konkrétně jeho vznikem, šířením prostorem a vnímáním lidskými smysly se zabývá věda nazývaná akustika. Jedná se o velmi rozsáhlý vědní obor, který je rozdělen do celé řady dílčích disciplín. Vývoj akustiky jako vědní disciplíny začal v devatenáctém století, kdy bylo zpočátku předmětem zájmu především studium příjemným a žádoucími zvuky, které byly generovány například hudebními nástroji. V současné době je pozornost vědeckých pracovníků a inženýrů, až na některé oblasti moderní akustiky, věnována převážně studiu nežádoucích akustických signálů. Tyto nepříjemné a obtěžující zvuky jsou označovány jako tzv. hluk. [3]

Tradičně je uváděno, že lidský sluch, resp. proces slyšení člověka se omezuje na konkrétní frekvenční oblast. Běžně je tato tzv. slyšitelná oblast udávána v rozmezí frekvencí 20 Hz až 20 kHz. Zvuky, které mají frekvenční obsah právě v tomto rozsahu a v lidském sluchovém aparátu vyvolávají sluchový vjem, jsou pak také označovány jako slyšitelné zvuky. Součástí této oblasti jsou i nízkofrekvenční zvuky, kterým je přiřazen frekvenční rozsah 20 až 200 Hz. Zvuky, které se nacházejí pod jejich spodní frekvenční hranicí, jsou označovány jako infrazvuky.

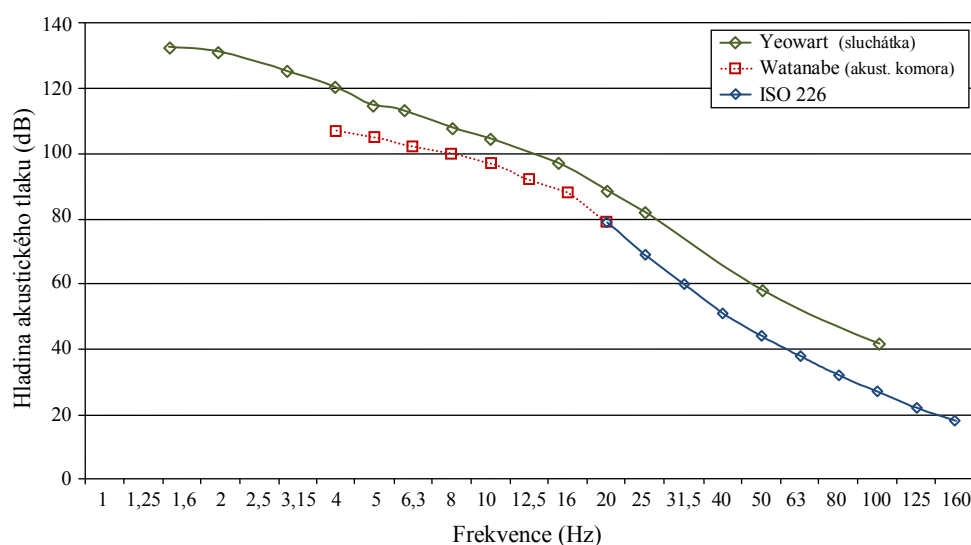
Infrazvuk je rovněž druhem zvuku a proto má stejné či podobné fyzikální vlastnosti jako slyšitelný zvuk. Jedná se o mechanické kmitání částic pružného prostředí ve frekvenčním rozsahu v rozmezí 0,1 až 20 Hz, které se tímto pevným, kapalným či plynným prostředím šíří konečnou rychlostí. Akustické vlny se od zdroje zvuku šíří prostorem ve vlnoplochách, a to postupným podélným nebo příčným vlněním v závislosti na vlastnostech daného prostoru. Částice se nepohybují shodným směrem s postupujícím vlněním, ale pouze kmitají kolem svých rovnovážných poloh.

Podmínkou vzniku každého zvuku je existence zdroje zvukového vlnění. Tím se může stát libovolné kmitající těleso, které svými vibracemi vyvolá zhušťování a zředňování atomů či molekul okolního prostředí. Zdrojem infrazvuku a nízkofrekvenčních zvuků jsou přírodní jevy jako například zemětřesení, bouřka, silný vítr, vlnobití, vulkanická činnost, laviny aj. Infrazvuková a nízkofrekvenční vlnění jsou také vytvářena uměle jako doprovodný jev při provozu elektráren, větrných elektráren, některých průmyslových a technických zařízení a strojů, jako jsou kompresory, ventilační technika a další. Významným zdrojem infrazvukového a nízkofrekvenčního vlnění jsou rovněž dopravní prostředky používané v osobní, nákladní a letecké dopravě.

Každý zdroj zvuku vytváří mechanické kmitání, které se šíří prostředím, nejčastěji vzduchem, v podobě tlakových fluktuací, jejichž hlavními atributy jsou amplituda a frekvence. Amplituda reprezentuje akustický tlak, zatímco frekvence určuje rychlost jeho změny. [9], [19], [60]

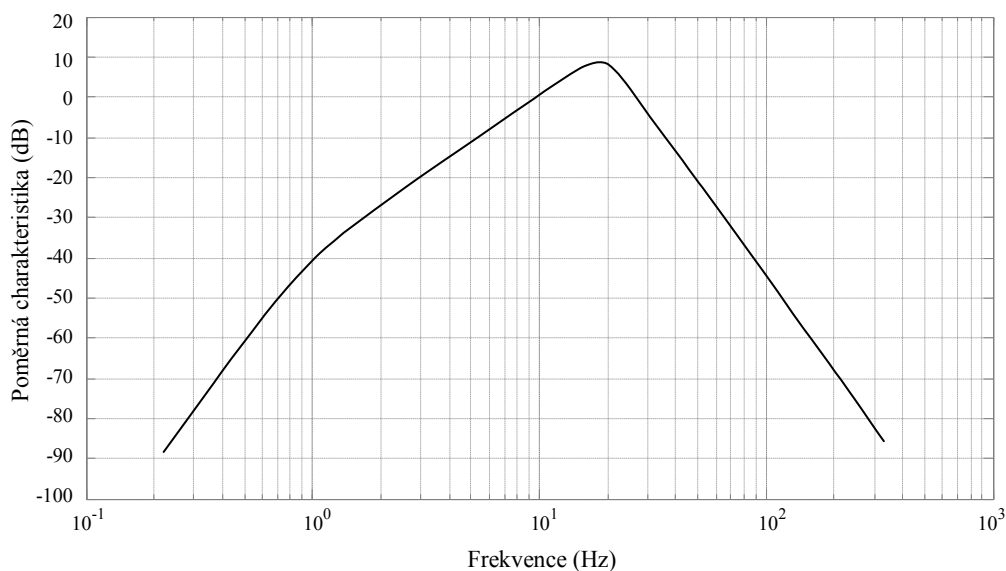
Z hlediska frekvenčního rozdělení je nízkofrekvenční zvuk druhem slyšitelného zvuku. Infrazvuk je všeobecně popisován jako neslyšitelný, nicméně při působení dostatečně vysoké akustické hladiny, jej lze také sluchem vnímat. U mladých, normálně slyšících osob bylo provedeno měření prahu slyšitelnosti infrazvuku při poslechu v akustické komoře a prostřednictvím sluchátek. Výsledky provedených pokusů evidentně prokázaly, že to zda je existující infrazvukové vlnění

slyšitelné, záleží především na hladinách akustického tlaku. Porovnání zjištěných hodnot se standardizovanou křivkou prahu slyšení danou ISO normou 226 z roku 2003 je na obr. 1.



**Obr. 1** Křivky znázorňující prahy slyšení v infrazvukové a nízkofrekvenční oblasti [60].

Stanovení prahů slyšitelnosti pro infrazvuková vlnění se stalo předmětem řady odborných studií, jejichž výsledkem je i vytvoření standardizované váhové křivky G (obr. 2), která je součástí normy ISO 7196 z roku 1995.



**Obr. 2** Znárodnění váhové funkce G pro infrazvuková měření. [30]

Váhová křivka G, která představuje frekvenční odezvu váhového filtru G, je určena pro frekvenční vážení zvukových signálů s ohledem na lidské vnímání hluku, jehož frekvenční spektrum leží částečně nebo zcela v infrazvukové oblasti. Konkrétně je navržena pro frekvenční rozsah 0,25 až 315 Hz. [30], [60]

## 2.2 Měření infrazvuku a nízkofrekvenčního zvuku

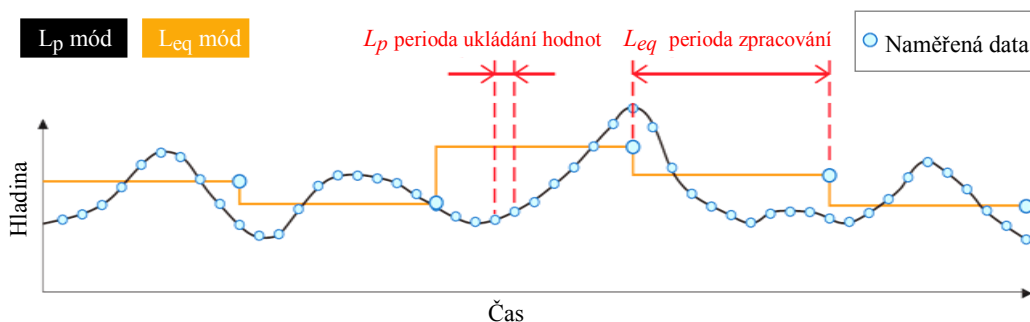
Měření infrazvuku je velmi obtížné, a to zejména z následujících důvodů:

- U každé osoby existuje značně odlišná citlivost na zvuk o nízkých frekvencích, a proto je těžké stanovit přítomnost infrazvuku.
- Pro měření infrazvuku nelze užít vybavení, které je konvenčně používáno při měření slyšitelného zvuku.
- I když je určen charakter infrazvuku, často lze velmi obtížně lokalizovat jeho zdroj, který může být od přijímače v poměrně značné vzdálenosti.

Měření nízkofrekvenčního zvuku lze realizovat běžnými měřicími přístroji, které jsou konstruovány pro měření slyšitelných zvuků, avšak pro měření infrazvuku je nutné použít sofistikovanou monitorovací techniku.

Majoritní část prováděných akustických měření je zaměřena převážně na zjišťování úrovně hluku, tedy na měření hladin akustického tlaku, intenzity či výkonu. Akustické hladiny se od sebe liší ve svém významu. Hladina akustické intenzity je ukazatelem hodnoty akustické intenzity, která dává informaci o velikosti a směru toků akustické energie. Využívá se pro měření, kterými je potřeba identifikovat zdroj zvuku v prostoru. Hladina akustického výkonu stanovuje akustický výkon, který je vyzařován zdrojem zvuku. Akustický výkon je nejvýznamnější charakteristikou zdrojů zvuku a umožňuje jejich vzájemné srovnávání a hodnocení. Oproti tomu hladina akustického tlaku určuje hodnotu akustického tlaku v místě, kde se nachází posluchač či detekující zařízení. [60]

Pro měření uvedených zvukových hladin je možno použít zařízení zvané zvukoměr, některými výrobci ne zcela správně označovaný také jako hlukoměr. Přístrojem totiž nelze měřit hluk komplexně, ale jsou měřeny pouze jednotlivé složkové signály zvuku a jejich výsledný, technicky kompilovaný projev. Při těchto měřeních se vyskytují převážně proměnná zvuková pole, pro jejichž vyhodnocování je využívána tzv. ekvivalentní trvalá hladina  $L_{eq}$ . Jde o fiktivní stálou hladinu, nejčastěji tlaku či intenzity, která má za stejný časový interval totožný účinek jako proměnný hluk, který je vyhodnocován. Kromě zmiňované hladiny je možno získat také hladiny exponenciálně časově vážené (F nebo S) efektivní hodnoty okamžitého akustického tlaku  $L_p$  (obr. 3). Některé zvukoměry umožňují výpočet obou hladin současně. V naprosté většině měření akustických hladin je zvoleno některé z dostupných frekvenčních vážení zvukových signálů. [47], [48]



**Obr. 3** Princip získávání hodnot  $L_p$  (okamžitá hladina akustického tlaku) a  $L_{eq}$  (ekvivalentní trvalá hladina akustického tlaku) prostřednictvím zvukoměru Rion NL-62. [47]

Okamžitou a ekvivalentní hladinu akustického tlaku lze vypočítat podle rovnic (1), (2).

$$L_{G\tau}(t) = 20 \log \left( \frac{\sqrt{\frac{1}{\tau} \int_{-\infty}^t p_G^2(\xi) e^{-\frac{(t-\xi)}{\tau}} d\xi}}{p_0} \right) \quad (1)$$

$L_{G\tau}$  (dB)...časově vážená hladina akustického tlaku s váhovou funkcí G (kmitočtové vážení),

$\tau$  (s)...exponenciální časová konstanta časové charakteristiky (F, S),

$\xi$  (s)...pomocná proměnná časové integrace od času v minulosti ( $-\infty$ ), do doby pozorování  $t$

$p_G$  (Pa)...okamžitý akustický tlak vážený funkcí G,

$p_0$  (Pa)...referenční akustický tlak (20  $\mu$ Pa).

$$L_{GeqT} = 20 \log \left( \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t p_G^2(\xi) d\xi}}{p_0} \right) \quad (2)$$

$L_{GeqT}$  (dB)...ekvivalentní hladina akustického tlaku s váhovou funkcí G (kmitočtové vážení),

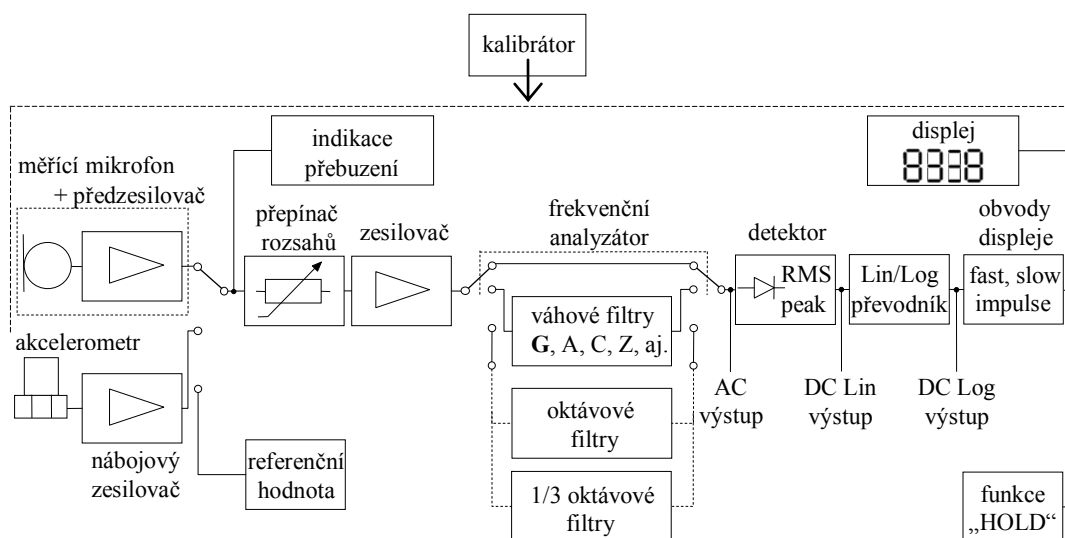
$T$  (s)...časový interval průměrování,

$\xi$  (s)...pomocná proměnná časové integrace během časového intervalu průměrování, končící v čase pozorování  $t$

[48]

Některé moderní typy zvukoměrů jsou natolik dokonalé, že lze jejich prostřednictvím provádět například i vibrační měření. Zásadním doplňkem těchto měřidel je pak frekvenční analyzátor pracující v reálném čase.

Na obr. 4 je znázorněno zjednodušené blokové schéma zvukoměrného řetězce, který je pro infrazvuková a nízkofrekvenční měření v podstatě obdobný, jako pro klasická měření prováděná ve slyšitelném frekvenčním rozsahu. Odlišnosti jsou v použití speciálních snímačů, které jsou konstruovány pro měření těchto nízkých frekvencí a také v aplikaci rozdílných filtrů.



**Obr. 4** Zjednodušené blokové schéma zvukoměrného řetězce. [2]

Každý zvukoměr obsahuje **indikátor přebuzení**, který signalizuje překročení nejvyšší odečitatelné hodnoty. Pro ochranu přístroje a jeho částí před nadměrnou expozicí hluku, lze využít **přepínač rozsahů** měřitelných hladin. Zde je volba optimálního rozsahu provedena, buď manuálně uživatelem, nebo automaticky samotným přístrojem. Nedílnou součástí dnešních moderních zvukoměrů jsou **váhové, oktávové, třetinooktávové filtry**, příp. další selektivní filtry, které se využívají k úpravě integrální frekvenční charakteristiky v celém frekvenčním rozsahu nebo pouze ve specifikované oblasti. Váhové filtry jsou relativně jednoduchá zařízení, která jsou realizována pomocí článků složených z cívek, odporů a kondenzátorů. Pro měření infrazvukových vlnění je využíván váhový filtr G. Pro měření nízkofrekvenčních zvuků lze využít váhový filtr G nebo také váhové filtry C či A, které jsou mezinárodně standardizované pro frekvenční rozsah 10 Hz až 20 kHz a jsou běžně součástí většiny zvukoměrů. Nicméně, u váhové funkce A, lze již pozorovat větší útlum v nízkofrekvenční oblasti. Kromě uvedených váhových filtrů je dostupný také váhový filtr Z (lineární), který odpovídá frekvenčně neváženému signálu a který lze rovněž využít pro infrazvuková a nízkofrekvenční měření.

Dalšími součástmi přístroje jsou **zesilovače** pro dodatečné zesílení signálu, dále detektor a zobrazovací jednotka. **Detektor** je zařízení, které zpracovává měřený signál. Výstupní napětí z detektoru se rovná zvolené hodnotě (nejčastěji efektivní hodnotě) vstupního signálu. U většiny dnešních přístrojů je možná volba mezi více druhy detektorů a tím také možnost zobrazení více hodnot měřených signálů. Zvukoměry tedy mohou obsahovat již zmíněný detektor efektivní hodnoty, dále například detektor vrcholové hodnoty nebo průměrující detektor, jehož výstupním signálem je střední hodnota vstupního signálu.

**Zobrazovací jednotka**, převážně digitální, je indikátorem hodnoty hladiny akustického tlaku v dB a také dalších hodnot, které přístroj umožňuje měřit. Tyto hodnoty jsou viditelně zobrazeny přímo na displeji zvukoměru nebo uloženy a následně zobrazeny pomocí vhodného zařízení, například počítače s příslušným softwarovým vybavením.

Rychlost reakce zobrazovací jednotky zvukoměru na změnu signálu je dána mechanickými a elektrickými vlastnostmi přístroje. Ty udávají časovou konstantu, se kterou je pak zobrazovaná hladina akustického tlaku časově vážena. Jmenovité časové konstanty jsou: rychlá F (Fast; 0,125 s), pomalá S (Slow; 1 s), impulzní I (Impulse). Například zvukoměr typ NL-62 od společnosti Rion, který je využíván pro měření infrazvuků, umožňuje navíc časové vážení zvukového signálu 10 s.

Hodnoty zobrazené na displeji musí přesně odpovídat hladině akustického tlaku, která je v místě měřicího mikrofону. Pro splnění tohoto požadavku musí být zvukoměry řádně kalibrovány.

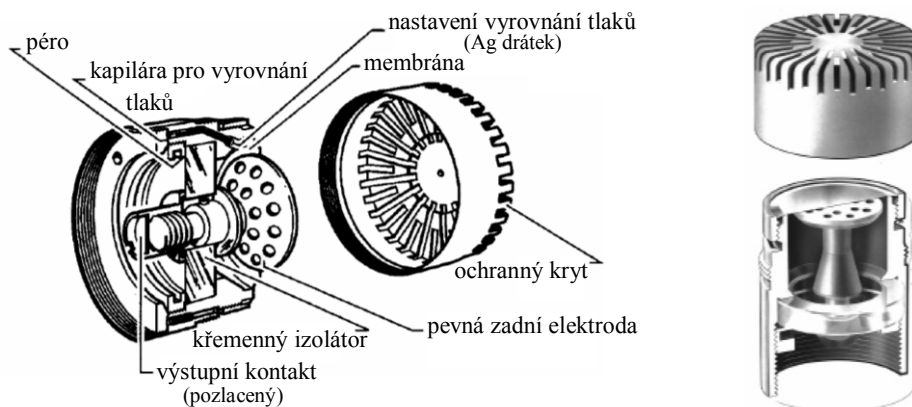
**Akustický kalibrátor** musí být vhodně zvolen. Celý měřicí systém pro měření infrazvuků, by měl být v ideálním případě kalibrován na frekvencích pro sinusové vstupy daných normou ČSN ISO 7196, tj. pro frekvence v rozsahu od 0,25 Hz do 315 Hz. Pokud nelze dosáhnout kalibrace v celém uvedeném frekvenčním rozsahu, pak je možné provést kalibraci v menším rozsahu frekvencí, avšak minimálně od 0,5 do 160 Hz. Při kalibraci by se mělo nastavit správné zesílení systému tak, aby pro měřený vstupní signál s frekvencí 10 Hz indikátor zvukoměru zobrazil korektní hodnotu hladiny akustického tlaku v dB vztaženou k referenční hodnotě akustického tlaku 20  $\mu$ Pa.

Běžně používaný akustický kalibrátor pro testování zvukoměrů je konstruován pro kalibrační úroveň 94 a 114 dB při kalibrační frekvenci 1000 Hz. [60]

Pro infrazvuková měření, lze využít například zvukoměry: typ NL-62 (Rion), typ 2250 nebo 2270 (Brüel & Kjær), Nor150 (Norsonic), 6238L (ACO), SVAN 912AE (Svantek) a SVAN 957 (Svantek). S oběma přístroji firmy Svantek, je možné realizovat i vibrační měření.

Frekvenční rozsah zvuku, který lze zvukoměrem měřit, je mimo jiné závislý na typu použitého snímače. V měřicí technice hluku a vibrací, obzvláště při zaměření se na infrazvuková měření, jsou právě snímače nejdůležitějšími prvky celého měřicího řetězce, neboť jejich konstrukce a vlastnosti podstatně ovlivňují přesnost, věrnost a spolehlivost naměřených výsledků. Dva základní využívané typy snímačů jsou mikrofon a akcelerometr. Vzájemně se od sebe liší primární měřenou veličinou, kterou je u mikrofonu akustický tlak zvuku a u akcelerometru akustické zrychlení vibrací. Vzhledem k tématu této práce je pozornost zaměřena výhradně na snímače typu mikrofon.

Mikrofon, umístěný na vstupu měřicího řetězce, představuje elektroakustický měnič, který převádí změny akustického tlaku na elektrický signál. Nejpoužívanějším a nejvíce preferovaným typem mikrofonu je ve zvukoměrné technice v současné době **elektrostatický mikrofon kondenzátorový**, ne zcela přesně označovaný pouze jako mikrofon kondenzátorový (obr. 5). [55]



**Obr. 5** Náhled konstrukce 1“ kondenzátorového mikrofonu (v řezu). [2], [31]

Elektrostatické mikrofony kondenzátorové patří mezi velmi kvalitní mikrofony, které vynikají značnou věrností přenosu akustických signálů v relativně rozsáhlém frekvenčním spektru. Jsou založeny na principu změny kapacity kondenzátoru, který je tvořen dvěma elektrodami a dielektrikem (vzduch). Tenká membrána v přední části mikrofonu, která je pro lepší vodivost pokryta nejčastěji zlatem, představuje pohyblivou elektrodu. Za ní je umístěna pevná, většinou perforovaná elektroda. Tyto velmi malé otvory v elektrodě umožňují pohyb vzduchu mezi dvěma dutinami. Jedna se nachází mezi membránou a pevnou elektrodou a druhá, větší, je uvnitř pouzdra mikrofonu. Uvnitř pouzdra se také nachází kapilára, která propojuje vnitřní prostor mikrofonu s vnějším okolním prostředím a slouží k pozvolnému vyrovnávání tlaku vzduchu mezi vnitřním prostorem mikrofonu a vnějším okolím při změně atmosférického tlaku okolního prostředí. [60]

Přicházející zvuková vlna rozkmitává membránu, čímž se mění vzdálenost mezi oběma elektrodami (v klidovém stavu je tato vzdálenost cca 10  $\mu\text{m}$ ). Se změnou vzdálenosti elektrod přímo souvisí změna kapacity kondenzátoru, který je těmito elektrodami tvořen. Kapacita mikrofonu je dána výpočtem dle rovnice (3):

$$C_m = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (3)$$

kde

$C_m$  (F)...kapacita mikrofonu,

$\epsilon_0$  (F.m<sup>-1</sup>)...permitivita vakua  $8,854187818 \times 10^{-12}$  F.m<sup>-1</sup>,

$A$  (m<sup>2</sup>)...plocha kondenzátoru (plocha účinné oblasti membrány),

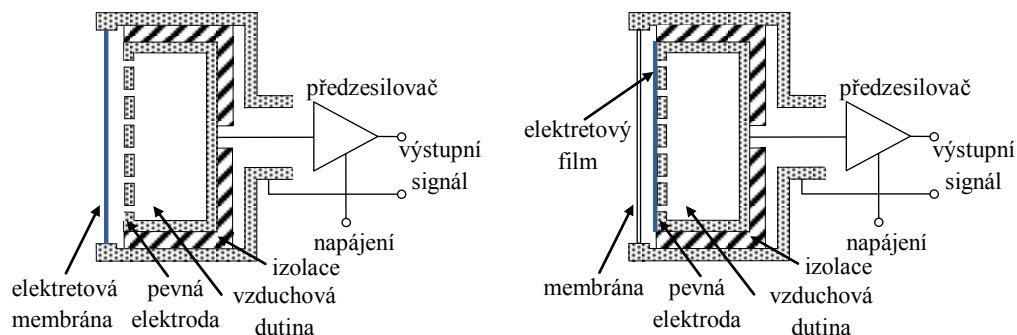
$d$  (m)...vzdálenost mezi deskami kondenzátoru (mezi elektrodami).

Například typický 1/2“ mikrofón, s hodnotami  $d = 20 \mu\text{m}$  a  $A = 45 \mu\text{m}^2$ , bude mít jmenovitou kapacitu  $C_m = 20 \text{ pF}$ . [49]

Tyto typy mikrofonů vyžadují pro svou funkci a pro uchování náboje v kondenzátoru polarizační napětí. Po připojení polarizačního napětí na tyto elektrody, je změna kapacity převedena na změnu elektrického napětí. Jelikož se jedná o poměrně malé změny, je napěťový signál dále zesílen vysoko-impedančním předzesilovačem, který obvykle bývá součástí těla mikrofonu.

Elektrostatické mikrofony kondenzátorové mohou být, z hlediska připojení polarizačního napětí, buď předpolarizované nebo externě polarizované (nepředpolarizované). **Externě polarizované mikrofony** vyžadují ke svému provozu připojení polarizačního napětí z vnějšího zdroje. Tento zdroj zároveň poskytuje napájení pro mikrofonní předzesilovač. Stejnoseměrné polarizační napětí má nejčastěji hodnotu mezi 30 až 200 V.

**Předpolarizované mikrofony**, někdy nazývané elektrostatické mikrofony elektretové, již pro svou funkci nepožadují polarizační napětí. Náboj je zde uchováván v nevodivé hmotě nazývané elektret. Z tohoto permanentně elektricky nabitého materiálu je vytvořena buď celá membrána mikrofonu (nevýhodou velká hmotnost membrány), nebo pouze vrstva na pevné elektrodě, kdy se jedná o moderní, tzv. back-elektretový typ mikrofonu (obr. 6). [50], [51]



**Obr. 6** Vlevo: Mikrofón s elektretovou membránou, vpravo: back-elektretový mikrofón. [51]

Součástí elektretového mikrofonu je vestavěný předzesilovač, který slouží k převodu vysokoimpedančního mikrofonního signálu na nízkoimpedanční signál, který již může být dále zpracován běžným způsobem. Napájen bývá konstantním napájecím proudem, obvykle o hodnotě v rozmezí 2 až 20 mA. Předzesilovač je charakteristický vysokou vstupní impedancí, která zabraňuje zeslabování náboje na elektrodách. Pro daný typ mikrofonu obvykle bývá výrobcem doporučen také vhodný typ předzesilovače. [52], [53]



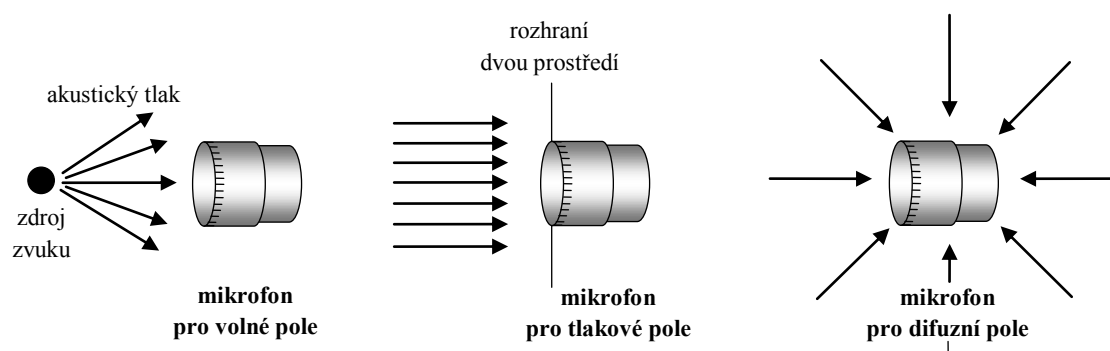
Předpolarizované typy mikrofonů je výhodné použít při měřeních s ručními zvukoměry, kde by bylo jinak velmi nepohodlné dodávat vysoké polarizační napětí. Externě polarizované mikrofony jsou konstrukčně méně náročné na výrobu, a tudíž levnější. Proto, z ekonomického hlediska, je výhodné jejich užití pro měření, která vyžadují zapojení více mikrofonů. [32]

Elektrostatické mikrofony a mikrofony obecně, lze dělit na tlakové nebo gradientní.

U **tlakových mikrofonů** je dopadající zvuková vlna, resp. působící akustický tlak registrován pouze přední stranou membrány. Výsledná amplituda kmitů membrány, tak nezávisí na směru, ze kterého zvuk přichází ani na vzdálenosti jeho zdroje od mikrofonu, avšak jen na velikosti akustického tlaku. To znamená, že tento typ mikrofonu je všesměrový a je tedy schopen zaznamenat zvukové vlny z libovolného směru. [32]

**Gradientní mikrofony** jsou typické tím, že zvukový signál je přiveden na přední i zadní stranu jejich membrány. Zde již výchylka membrány nezávisí přímo na absolutní hodnotě působícího akustického tlaku, ale na jeho rozdílu před a za membránou. Mikrofon je tedy směrový a je schopen dobře zaznamenat zvuky, které přicházejí ze stran, z nichž je jeho konstrukce otevřena.

Dále lze mikrofony dělit například podle vlastností a průběhu frekvenční charakteristiky na mikrofony pro volné pole, pro tlaková měření a pro difuzní pole (obr. 7). [33], [55]



**Obr. 7** Princip měření akustického tlaku u mikrofonů pro volné, tlakové a difuzní pole. [53]

**Mikrofony pro volné pole** jsou nejčastěji používaným typem mikrofonu. Nejpresnější výsledky jsou prostřednictvím tohoto mikrofonu získány, pokud je měřený akustický tlak vyzařován pouze z jednoho směru a jediného zdroje zvuku. Ideálně přímo na membránu mikrofonu, pod úhlem dopadu  $0^\circ$  a s minimalizací odrazivosti vln. Z toho důvodu jsou nejvhodnějšími místy pro měření bezdovukové komory nebo větší otevřené prostory.

**Tlakové mikrofony** jsou zpravidla namontovány do dutiny nebo na hranici dvou prostředí (stěny budov), kde měří akustický tlak, který je vyvíjen na přední stranu membrány mikrofonu. Tlakové pole je charakteristické tím, že v každé jeho oblasti je stejná amplituda a fáze akustického tlaku, proto zde nezáleží na směru, ze kterého přichází akustické vlnění.

**Mikrofony pro difuzní pole** jsou navrženy jako všesměrové mikrofony, které měří akustický tlak pocházející z více zdrojů, více směrů a mnoha odrazů. Jsou tedy určeny pro měření zvuku v reverberační komoře nebo v jiném vysoce odrazivém prostředí, kde šířící se zvukové vlny nemají dán přesný směr šíření a dorazí k membráně mikrofonu současně, avšak z různých směrů.

[34], [53]

Každý mikrofon má konkrétní vlastnosti, od kterých jsou odvozeny možnosti jeho využití. Mezi základní vlastnosti elektrostatických mikrofonů kondenzátorových patří:

- velikost,
- citlivost,
- frekvenční charakteristika,
- směrovou charakteristika,
- dynamický rozsah a vlastní šum.

**Velikost** mikrofonu je uváděna převážně v anglických palcích a je to hodnota charakterizující vnější průměr mikrofonu. Nejčastěji se pro měřicí účely používají mikrofony o standardizované velikosti 1“ (25 mm), 1/2“ (12 mm), 1/4“ (6 mm). S velikostí mikrofonu jsou úzce spjaty i ostatní vlastnosti mikrofonu. Obecně platí, že mikrofony s větším průměrem mají vyšší citlivost a jsou tedy použitelné k měření nízkofrekvenčních a infrazvukových vlnění, a to o velmi nízkých hladinách akustického tlaku. Menší mikrofony jsou pak vhodné pro vysokofrekvenční měření s vysokými hladinami akustického tlaku.

Velikost mikrofonu determinuje horní mezní frekvenci, kterou lze s konkrétním mikrofonom měřit. Zde je důležitá vlnová délka zvuku, která je porovnávána s velikostí mikrofonu. Pokud je vlnová délka zvuku shodná s rozměrem mikrofonu, dochází na mikrofonní membráně k maximálnímu zvýšení akustického tlaku a odpovídající frekvence zvuku je zároveň maximální měřitelnou frekvencí. Lze ji zjistit dle následujícího vzorce (4):

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (4)$$

kde

$f$  (Hz)...horní mezní frekvence

$c$  ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )...rychlost zvuku ve vzduchu ( $c = 331,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} + 0,6\cdot T$ , kde  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) je teplota vzduchu),

$\lambda$  (m)...vlnová délka zvuku, která je zde shodná s velikostí mikrofonu.

Například s 1/2“ (12,7 mm) mikrofonom, lze měřit maximálně zvuk o frekvenci cca 26,9 kHz (počítáno s rychlostí zvuku 342 m/s, která odpovídá teplotě okolního vzduchu 17  $^{\circ}\text{C}$ ).

[34], [53]

**Citlivost** mikrofonu je dána poměrem výstupního napětí mikrofonu a akustického tlaku působícího na membránu, který dané napětí vybudil. Je to frekvenčně závislá veličina a je uváděna jako nominální hodnota citlivosti mikrofonu ve stavu naprázdno, tj. v případě, že mikrofon není zatížen vstupní impedancí předzesilovače. Citlivost mikrofonu je platná pro měření ve volném poli, difúzním poli i pro tlaková měření, a to nejčastěji pro referenční frekvence 1 kHz nebo 250 Hz (přesně  $10^{2,4}$  Hz, dle ISO 266) při teplotě okolního prostředí 23  $^{\circ}\text{C}$  a relativní vlhkosti 50 %. Nejčastěji je uváděna v jednotkách V/Pa nebo v relativní hodnotě v jednotkách dB, vztažené k referenci 1V/Pa.

Po připojení předzesilovače na mikrofon se změní celková citlivost, a to dle následujícího vztahu (5):

$$S_c = S_o + G \quad (5)$$

kde

$S_c$  (dB)...celková citlivost kombinace mikrofonu a předzesilovače,

$S_o$  (dB)...citlivost mikrofonu naprázdno,

$G$  (dB)...napětové zesílení kombinace mikrofonu a předzesilovače.

Například 1/2“ kondenzátorový mikrofon typ 4189 (Brüel & Kjær), který lze také užít pro infrazvuková a nízkofrekvenční měření, má jmenovitou hodnotu citlivosti 50 mV/Pa, neboli -26 dB ref. 1V/Pa, s přípustnou odchylkou  $\pm 1,5$  dB. 1/2“ mikrofonní předzesilovač typu 2669 (Brüel & Kjær) má nominální hodnotu zesílení  $G$  -0,25 dB. Pokud je při kalibraci zjištěna citlivost mikrofonu naprázdno např. -26,3 dB, dle rovnice (5), pak celková citlivost mikrofonu s připojeným předzesilovačem činí -26,55 dB.

U některých zařízení firmy Brüel & Kjær je zaveden  $K\_faktor$  nebo  $K_o\_faktor$  v jednotkách dB, což je korekční činitel pro kalibraci mikrofonu a předzesilovače, který je počítán následovně:

$$K\_faktor = -26 - S_c \quad (6)$$

$$K_o\_faktor = -26 - S_o \quad (7)$$

Citlivost, jak již bylo uvedeno, je závislá na velikosti mikrofonu, ale také na napnutí jeho membrány. Mikrofon s volnou membránou bude mít větší citlivost než mikrofon s tuhou membránou.

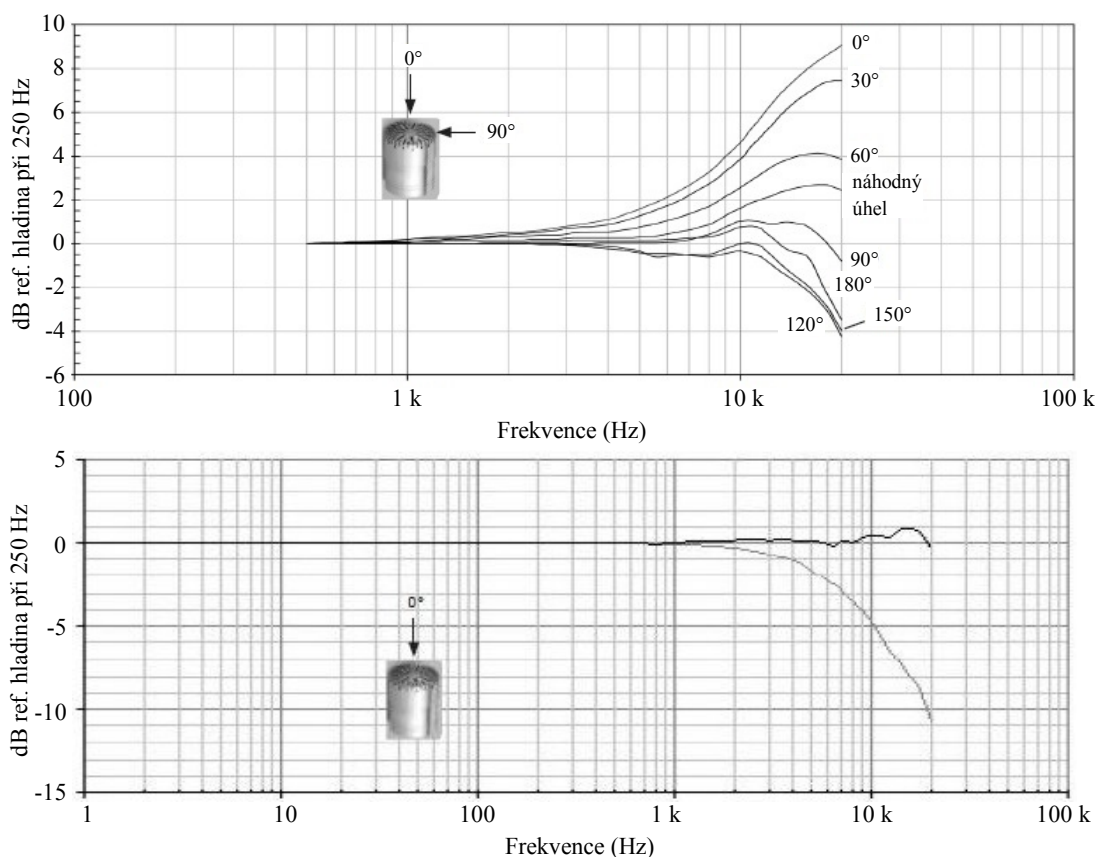
[32], [40], [57]

**Frekvenční charakteristika** je další vlastností mikrofonu. Jedná se o závislost citlivosti mikrofonu na frekvenci zvuku nebo závislost výstupního napětí mikrofonu na frekvenci zvuku (při konstantním akustickém tlaku). Frekvenční charakteristika je grafické znázornění rozsahu přenášeného frekvenčního pásma daným typem mikrofonu. Na vodorovné logaritmické ose jsou zobrazeny frekvence a na vertikální ose k nim příslušná poměrná odezva mikrofonu v jednotkách dB. Dolní mezní frekvence měřitelná mikrofonom je všeobecně stanovena jako frekvence, které odpovídá ve frekvenční charakteristice hodnota -3 dB (při standardním atmosférickém tlaku). Horní mezní frekvence souvisí s rezonancí mikrofonní membrány a odpovídá frekvenci, v níž je hodnota hladiny 2 dB pod referenční úrovní 0 dB. Rezonanční frekvence je určena již při výrobě mikrofonu a je ovlivněna hmotností, tuhostí a napnutím membrány. Stejně tak je měřena a kontrolována hodnota pro minimální frekvenci, aby se zajistilo, že budou splněny všechny povinné specifikace. [39], [41], [52], [54]

Pro kvalitní přenos signálu v požadovaném frekvenčním pásmu je nutné, aby zvlnění charakteristiky nepřesáhlo oproti ustálenému průběhu hodnotu  $\pm 5$  dB. Technickými normami je stanovena tolerance frekvenční odezvy  $\pm 2$  dB (v některých případech  $\pm 1$  dB). [39], [53]

Mikrofony pro volné pole, svým umístěním do zvukového pole, místně zvyšují akustický tlak. Tento jev se děje kvůli odrazům a ohybům zvukových vln od kapsle mikrofonu. Projevuje se až při vyšších frekvencích zvuku nad 1 kHz, při nízkých frekvencích je minimální. Frekvenční charakteristiky těchto mikrofonů je nutné navrhovat tak, aby kompenzovaly uvedené zvýšení tlaku. Prakticky je u mikrofonů kompenzace realizována zvýšením tlumení uvnitř mikrofonní vložky. Výsledná frekvenční charakteristika již zohledňuje kompenzační efekt, přičemž ideálně by měla být co nejvíce plochá. Pro určení frekvenční odezvy mikrofonu ve volném poli při různých úhlech

měření zvuku, jsou stanoveny korekční křivky (obr. 8). V některých případech jsou vytvořeny korekční křivky také pro užití mikrofону s ochranným krytem proti větru. [34], [57]



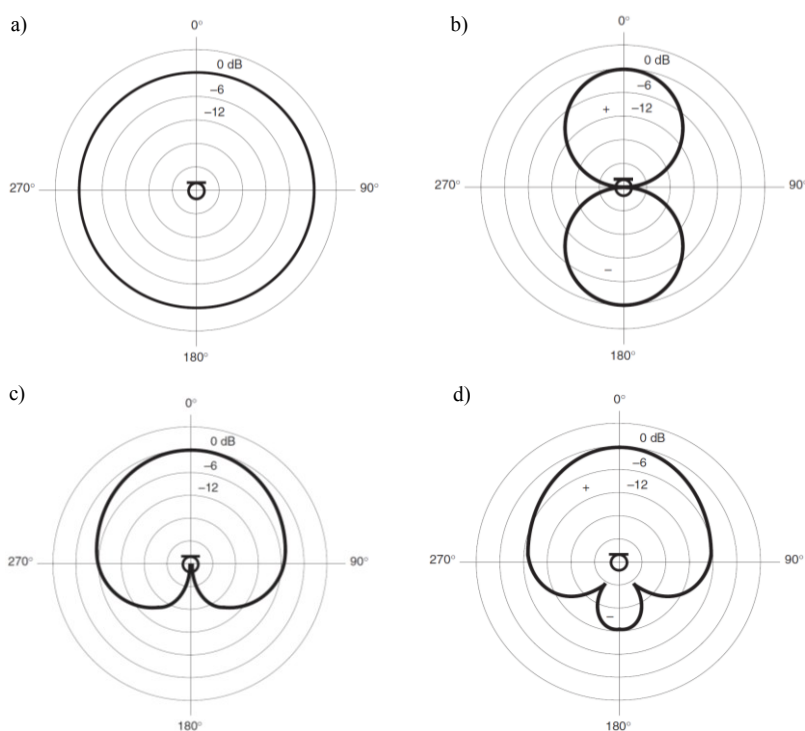
**Obr. 8** *Nahoře:* Korekční křivky 1/2" mikrofону pro volné pole (pro různé úhly dopadu zvuku). *Dole:* Specifická frekvenční odezva mikrofону typ 40AZ (GRAS). Horní křivka je odezva ve volném poli při úhlu 0°, dolní křivka je odezva na akustický tlak. [34]

**Směrová charakteristika** mikrofону je závislost citlivosti mikrofonu na úhlu, který svírá akustická osa mikrofonu s osou zdroje zvuku. Udává citlivost s jakou je mikrofon schopen snímat zvukové vlny, které přicházejí jak v ose mikrofonu, tak i mimo ni. Akustická osa rotačně symetrických mikrofónů je obvykle shodná s jejich geometrickou osou. Směrové charakteristiky mikrofónů jsou většinou odlišné pro různé frekvence zvuku, jsou tudíž frekvenčně závislé. Obvyčejně jsou k dispozici v manuálu k danému mikrofónu. [42], [55]

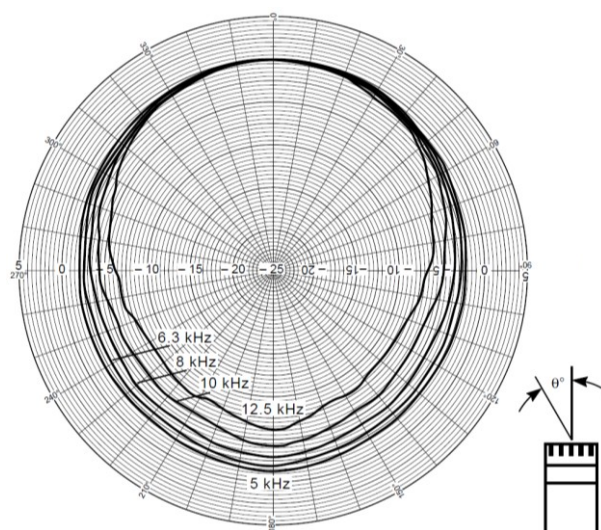
Standardně jsou směrové charakteristiky zaznamenány do tzv. polárního grafu (angl. *polar pattern*), který může obsahovat více charakteristik pro rozdílné frekvence (obr. 10). Vzdálenosti od středu, který je považován za lokalizaci mikrofónu, jsou obvykle kalibrovány v hodnotách dB, se jmenovitou hodnotou 0 dB, která je zároveň referenční hodnotou a ukazatelem maximální odezvy mikrofónu na úhel 0° při frekvenci 1 kHz. Platí, že čím je znázorněná charakteristika dále od středu grafu, tím větší je hodnota výstupního signálu z mikrofónu při daném úhlu. [56]

Některé typy mikrofónů jsou konstruovány tak, že umožňují postupnou volbu z více směrových charakteristik, dle účelu aplikace.

Mezi základní směrové charakteristiky patří kulová (*omni-directional*), osmičková (*figure-eight*, *bi-directional*), kardioidní (*cardioid*), superkardioidní a hyperkardioidní charakteristika (obr. 9).



**Obr. 9** Idealizované směrové charakteristiky v kruhovém diagramu: a) kruhová, b) osmičková, c) kardioidní, d) hyperkardioidní. [56]



**Obr. 10** Ukázka polárního grafu s reálnými směrovými charakteristikami mikrofonu pro různé frekvence (typ 4189 (Brüel & Kjær) s ochrannou mřížkou). [40]

U směrových mikrofonů lze pozorovat tzv. *proximity efekt*. Je to jev, při němž dochází k výraznému zesílení nízkých frekvencí, pokud se zdroj zvuku přiblíží k mikrofonu na vzdálenost menší než asi 50 cm. [56]

**Dynamický rozsah a vlastní šum** jsou vlastnosti mikrofonu, které spolu souvisejí. Dynamický rozsah mikrofonu je rozsah mezi maximální hodnotou, která je limitována výchylkou membrány mikrofonu a minimální hodnotou, která je dána vlastním šumovým pozadím mikrofonu. Vlastní šum mikrofonu je vyvolán termálním pohybem molekul vzduchu, které narážejí na membránu mikrofonu. Tento tepelný šum mikrofonu je zodpovědný za generování velmi malého napětí okolo 5  $\mu\text{V}$ . To se objevuje na výstupu mikrofonu i při jeho umístění v absolutně tichém prostředí. Pokud je známa citlivost mikrofonu, lze tuto minimální hladinu akustického tlaku vypočítat dle následující rovnice:

$$\frac{u_o}{S_o} = p_a \quad (8)$$

kde

$u_o$  (V)...výstupní napěťový signál z mikrofonu (většinou v efektivní hodnotě),

$S_o$  (V/Pa)...citlivost mikrofonu naprázdno,

$p_a$  (Pa)...minimální hladina akustického tlaku.

Pro měřicí mikrofony o citlivosti 50 mV/Pa je odpovídající hodnota akustického tlaku pro tepelný šum o napětí 5  $\mu\text{V}$  dle (8):

$$\frac{5\mu\text{V}}{50\text{ mV/Pa}} = 10^{-4}\text{ Pa}$$

Hladina akustického tlaku, která je nejmenší měřitelnou hladinou, pak činí:

$$L_p = 20 \log \left( \frac{p_a}{p_0} \right) \quad (9)$$

$$L_p = 20 \log \left( \frac{10^{-4}}{20 \cdot 10^{-6}} \right) \cong 14\text{ dB}$$

kde

$L_p$  (dB)...hladina akustického tlaku,

$p_a$  (Pa)... minimální hladina akustického tlaku,

$p_0$  (Pa)...referenční akustický tlak 20  $\mu\text{Pa}$ .

Vlastní šum mikrofonu, lze také zjistit na základě odstupu užitečného signálu od šumu (angl. *Signal to Noise Ratio*, zkr. *SNR*). Ten se určí jako poměr výstupního napětí mikrofonu  $u_o$ , které vyvolá referenční akustická hladina 94 dB (dle rovnice (9),  $p_a = 1\text{ Pa}$ ), a šumového napětí  $u_s$  5  $\mu\text{V}$  na výstupu mikrofonu, umístěného v dokonale tichém prostředí. Pro výpočet výstupního napětí mikrofonu, při působení akustického tlaku 1 Pa, lze užít upravený vztah (8). Výsledná hodnota výstupního napětí je 0,05 V. Odstup signálu od šumu je vypočten následujícím způsobem.

$$SNR = 20 \log \left( \frac{u_o}{u_s} \right) \quad (10)$$

$$SNR = 20 \log \left( \frac{0,05}{5 \cdot 10^{-6}} \right) = 80\text{ dB}$$

Vlastní šum mikrofonu je následně vypočten, jako rozdíl referenční hladiny a zjištěné hodnoty *SNR*:

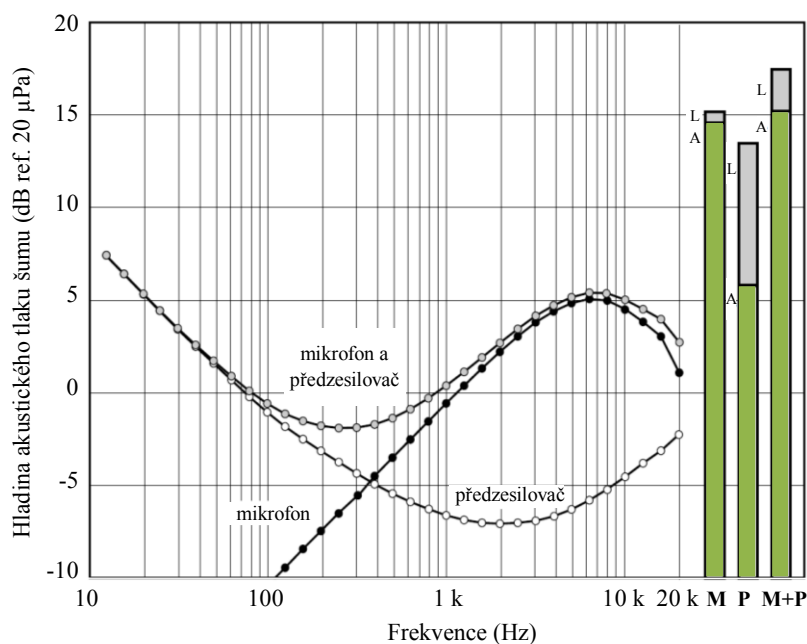
$$94\text{ dB} - 80\text{ dB} = 14\text{ dB}$$

[32], [56]

Teoreticky by tedy bylo možné s mikrofonom o citlivosti 50 mV/Pa měřit hladiny až do dolní mezní hodnoty 14 dB. V praxi je však k mikrofону nutné připojit předzesilovač, který rovněž ovlivňuje dynamický rozsah tím, že ještě zvyšuje množství šumu. Typický předzesilovač svou konstrukcí a prvky elektrického obvodu generuje širokopásmový šum o hodnotě přibližně 3  $\mu$ V.

Při velkém vychýlení membrány, dochází k nelineární změně kapacity mikrofonu a ke zkreslení výstupního signálu. Za horní mez dynamického rozsahu je považována hladina akustického tlaku, kde hodnota zkreslení (angl. *Total Harmonic Distortion*, zkr. *THD*) činí 3%. Tato hodnota zkreslení byla standardizovaná výrobcí, neodpovídá však maximální měřitelné hladině. Absolutní hodnota maximální měřitelné hladiny je závislá na napájecím napětí páru mikrofón-předzesilovač, tj. na maximálním výstupním napětí a opět na citlivosti samotného mikrofonu. [34], [53]

Na obr. 11 je graficky znázorněn vliv vlastního šumu 1/2" mikrofonu typu 4189, 1/2" předzesilovače typu 2669 (Brüel & Kjær) a jejich spojení, na dynamický rozsah měření při různých frekvencích. Jak je zde patrné, mikrofón zde představuje hlavní zdroj šumu ve vyšších frekvencích, zatímco šum předzesilovače dominuje v nízkých frekvencích. Spojením obou prvků se zvýší vlastní šum celého zapojení, který je výrazný jak v nízkých, tak i vysokých frekvencích. [40]



**Obr. 11** 1/3 oktavové spektrum vlastního šumu mikrofónu (typ 4189), předzesilovače (typ 2669) a jejich spojení; sloupkové grafy vpravo znázorňují hladinu širokopásmového šumu 20 Hz až 20 kHz (šedě) a šumu váženého funkcí A (zeleně) mikrofónu (M), předzesilovače (P) a jejich kombinace (M+P). [40]

Pro optimální výběr mikrofónu je třeba zohlednit zmiňované parametry. Hlavním kritériem při výběru vhodného mikrofónu je oblast a způsob jeho použití. Kromě zmiňovaných charakteristik mikrofónu existují i další důležité vlastnosti, jako provozní teplota nebo relativní vlhkost.

Při měření infrazvukových vlnění v terénu mohou být výsledné hodnoty ovlivněny větrem. Z toho důvodu je doporučováno používání ochranných krytů mikrofónu ze speciální polyuretanové pěny, které potlačují rušivý vliv větru a zároveň chrání mikrofón proti prachu. [57]

### 3 Vliv zvuků s obsahem nízkých frekvencí na lidský organismus

#### 3.1 Kritéria hodnocení expozice zvuku

Zvuk je zcela přirozeným projevem přírodních fenoménů a také činnosti člověka. U člověka jsou všechny zvuky registrovány sluchovým ústrojím a zpracovávány v mozku. Prostřednictvím slyšení lze získat velmi mnoho informací z prostředí, zahrnujících jak pozitivní, tak také negativní sdělení.

Každý zvuk, který je možné označit jako nežádoucí, lze považovat za hluk. Nicméně je nutné přihlídnout k individuálnímu vztahu člověka k danému zvuku. Pro některého jedince je určitý zvuk hlukem, zatímco pro jiného člověka může být stejný zvuk méně nepříjemný nebo i důležitý zdroj informace. Proto, pokud jsou řešena opatření proti hluku, jsou tímto hlukem myšleny zbytečné a neúměrně silné zvuky, které ruší a znepříjemňují život a práci člověka nebo dokonce negativně ovlivňují či poškozuji jeho zdravotní stav. Obecně by pro snížení hluku na přijatelnou úroveň, byla nutná jeho výrazná redukce, což je opět způsobeno vnímáním určitého hluku lidským sluchem. Například snížením akustického výkonu zdroje hluku na polovinu původní hodnoty je ve výsledku hladina hluku snížena pouze o 3 dB, což je pro průměrného posluchače stěží znatelné. Navíc mezi akustickým a mechanickým výkonem existuje přímá úměrnost. Pro dodržení hygienických hlukových limitů působí tato skutečnost v dnešní době, kdy jsou tendence vyvíjet neustále výkonnější stroje, velké technické potíže při návrhu konstrukčního řešení zařízení. [3], [45]

Většina hodnocení hlučnosti prostředí je prováděna na základě znalosti akustických hladin, které jsou získány měřením pomocí zvukoměrů. Tyto hladiny jsou váženy některou z dostupných váhových funkcí, obvykle A (pro infrazvuky nutné použít G nebo Z) a dále upraveny do požadovaného tvaru. Mezi základní používané akustické deskriptory patří:

- $L_{Aeq,T}$  ekvivalentní hladina akustického tlaku A,
- $L_{pAmax}$  maximální hladina akustického tlaku A,
- $L_{AE}$  hladina zvukové expozice,
- $L_{AN}$  distribuční hladiny (především  $L_{A1}$ ,  $L_{A10}$ ,  $L_{A50}$ ,  $L_{A90}$ ),
- $L_{dvn}$  dlouhodobá průměrná ekvivalentní hladina (kapitola 3.3).

Ekvivalentní hladina  $L_{Aeq,T}$  je energetický průměr okamžitých hladin akustického tlaku v daném časovém intervalu (viz kapitola 2.2). Je základem pro výpočet mnohých dalších ukazatelů a přípustných hladin hluku v daném prostředí. Dalším hlukovým deskriptorem je hladina zvukové expozice  $L_{AE}$  (angl. *Sound Exposure Level*, zkr. *SEL*). Jedná se v podstatě o ekvivalentní hladinu akustického tlaku  $L_{Aeq,T}$  váženou funkcí A, která je normalizovaná pro čas  $T = 1$  s, což představuje výskyt jedné hlukové události. Z takto získaných diskretních hlukových události lze pak vypočítat výslednou  $L_{Aeq,T}$ , vztahenou na celý časový úsek  $T$  pro celkový počet případů  $n$ , dle vztahu (11).

$$L_{Aeq,T} = 10 \log \left( \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n \left( 10^{\frac{L_{AE_i}}{10}} \right) \right) \quad (11)$$

kde

$L_{AE_i}$  (dB)... hladina zvukové expozice  $i$ -té hlukové události,

SEL je vhodným ukazatelem hodnocení hluku z leteckého provozu. [2], [35]



Distribuční neboli procentní hladina zvuku  $L_{AN}$  (angl. *Percentile Sound Level*) je využívána pro hodnocení proměnlivého a přerušovaného hluku.  $L_{AN}$  je hladina akustického tlaku vážená váhovým filtrem A, jejíž výskyt převyšuje udávané procento daného časového intervalu, jedná se tedy o četnost výskytu. Nejčastěji jsou využívány procentní hladiny  $L_{A1}$ ,  $L_{A10}$ ,  $L_{A50}$ ,  $L_{A90}$  nebo  $L_{A99}$ . Například  $L_{A50}$  je hodnota hladiny zvuku s 50 % výskytem v daném časovém intervalu neboli 50 % vzorků<sup>1</sup> se rovná nebo přesahuje hladinu hluku  $L_{A50}$ . Procentní hladiny lze získat přímo pomocí některých typů zvukoměrů nebo je možné jejich odvození z histogramu či kumulativní distribuční křivky. [2], [35]

Dalšími důležitými ukazateli, které je třeba zohlednit při hodnocení škodlivosti hluku, jsou jeho frekvenční obsah, doba působení, impulzní charakter, kolísavost hladin nebo také denní a roční doba či dokonce fyzický, psychický a sociální stav exponovaných osob. [45]

U některých širokopásmových hluků, které obsahují jak vysokofrekvenční, tak i nízkofrekvenční složky je problematičtější právě energie v nízkofrekvenční oblasti, neboť nízkofrekvenční hluk o vysokých hladinách je považován za obtěžující a v jistých případech i škodlivý pro lidský organismus. Pro zjištění nízkofrekvenčního obsahu je vhodné provést pásmovou frekvenční analýzu, např. v třetinooktávových pásmech. Pokud ji nelze realizovat, lze podíl nízkých frekvencí orientačně určit měřením hladin akustického tlaku zvuku současně váhovým filtrem A a C. Z rozdílu výsledků lze následně orientačně posoudit, zda je akustická energie koncentrována do nízkofrekvenční oblasti. [46]

### 3.2 Ovlivnění fyzického a psychického stavu exponovaných osob

Významnou vlastností zvuků a hluků, zejména pak těch s nízkofrekvenčním obsahem, je jejich šíření na velké vzdálenosti, přičemž se srovnatelně dobře šíří vzduchem, vodou i pevnou hmotou. Navíc se akustické vlnění při dopadu na překážku může odrazit, lomit nebo ohnout a akustická energie je tedy schopna zasáhnout velkou oblast. S ohledem na to, že infrazvukové a nízkofrekvenční zvukové vlnění vykazuje snadnější prostup a menší útlum při jeho šíření prostředím oproti vysokofrekvenčnímu zvuku, lze například v interiérech budov očekávat větší energii zvuků o nízkých frekvencích. Při posuzování míry rušivosti, pak může nastat problém s nepřesnostmi v případě, že se použijí data se zaznamenanými hladinami z venkovního prostředí. Tyto obtěžující zvuky s nízkofrekvenčním obsahem jsou popisovány jako dunivý zvuk slyšitelný z dálky, který je mnohem nepříjemnější při výskytu v noční době. [3], [46]

Byla provedena řada studií, výzkumů a průzkumů, zabývajících se účinky nízkofrekvenčního zvuku a infrazvuku na lidský organismus.

V roce 2001 byla technickou univerzitou Lund ve Švédsku zveřejněna studie, týkající se obtěžujícího hluku generovaného při silniční dopravě. Podle ní je právě silniční doprava hlavním zdrojem hluku v zastavěném městském prostředí. Dopravní hluk se šíří přes zdi budov s okny orientovanými k silnici až do interiérů, kde již negativně ovlivňuje člověka – detekovatelné vibrace nebo sluchové percepce typu dunění či drnění. Z hlediska frekvenčního složení hluku ze silničního provozu spadá velká část spektra do nízkých frekvencí, zejména kolem 60 Hz. To má za následek

---

<sup>1</sup> Procentní hladiny se stanovují ze vzorkovaného časového průběhu hluku. [31]

**rezonance hrudníku** či některých dalších částí lidského těla, kde se v závislosti na individuálních vlastnostech pohybuje rezonanční frekvence v rozmezí od 30 do 90 Hz, průměrná hodnota je 74 Hz u mužů a 64 Hz u žen. Tento efekt je samozřejmě možné pozorovat nejen u osob uvnitř budov, ale také u chodců podél silnic. [45]

Dále bylo zjištěno, že se u osob vystavených infrazvuku a nízkofrekvenčnímu hluku, mohou vyskytovat **poruchy spánku, narušení koncentrace** při vykonávání duševní práce a určitý **pocit nepohodlí**. Při zvýšení intenzity infrazvuku se u exponovaných osob objevují **závratě, psychická únava, podrážděnost, nauzea, bolesti hlavy, ztráta rovnováhy** a také **stres**, který je možnou příčinou dalších závažnějších zdravotních problémů. Účinky hluku však ve většině případů nejsou bezprostřední, ale postupně se kumulují, čímž se negativně projeví až za delší dobu. Samozřejmě jsou, jak již bylo uvedeno, velmi individuální a dokonce lze z psychologického hlediska pozorovat u některých osob návyk na určitý typ hluku. [3], [35], [45]

Mírou dopadu působení infrazvuku na člověka v závislosti na jeho výskytu při určité hladině akustického tlaku se zabývá i další studie, ve které jsou působící hladiny akustického tlaku spolu s rozsahem poškození rozděleny na čtyři stupně (tab. 1). Lze vyčíst, že velmi intenzivní infrazvukové vlnění, může vyvolat **vnitřní krvácení** a dokonce **smrt**, pokud je expozice déletrvající. Ve skutečnosti se však tyto extrémně vysoké hladiny vyskytují jen v laboratorních podmínkách a v každodenním prostředí jsou mimořádně vzácné. [35], [38], [45], [60]

**Tab. 1** Stupně dopadu působení infrazvuků na člověka v závislosti na hladině akustického tlaku. [38], [60]

Stupeň poškození	Hladina akustického tlaku (dB)	Projevy působení infrazvuku
I (smrtný)	>185	Roztrhání plicních alveolů
II	145–172	Lze vydržet působení po dobu 2 minut
III	120–140	Reakční doba se prodlužuje, obtížná koncentrace
IV	<120	Rychlejší pocit únavy, objevení známek nevolnosti

Mezi prokazatelné účinky infrazvuku o vyšších hladinách akustického tlaku, lze zařadit **rezonance** některých **vnitřních orgánů** nebo i **celého těla**. Toto nastává v případě, kdy se budící frekvence přibližuje k vlastní frekvenci dané části lidského těla. Vliv tohoto vynuceného kmitání je závislý na způsobu jeho přenosu na lidské tělo a také na fyzikálních vlastnostech infrazvuku (amplituda, frekvence). Nejcitlivější je tělo na infrazvuková vlnění či vibrace v rozsahu 1 až 8 Hz. Infrazvuky o frekvencích mezi 0,01 až 5 Hz jsou zodpovědné za tzv. nemoci z pohybu neboli kinetózy. Působení infrazvuků ve frekvenčním rozsahu 3 až 6 Hz způsobuje **rezonance žaludku**. V důsledku toho často dochází k nárazům žaludku do bránice, s čímž je spojeno také rozkmitání proudu vydechovaného a vdechovaného vzduchu plicemi, právě v rozsahu dané budící frekvence. Objevují se tak problémy při řečové komunikaci a zvýšení výšky hlasu, kvůli celkovému zvětšení svalového napětí. Lze pozorovat třes hlasu, který je modulován touto frekvencí, a v krajním případě až nemožnost plynulé mluvy. [35]

Na infrazvukové frekvence okolo 8 Hz je obzvlášť citlivá mozková kůra, neboť se jedná o frekvenci shodnou s frekvencí alfa vln. Dochází k ovlivnění morfologie elektrických biopotenciálů lidského mozku, přičemž jsou tyto změny patrné na EEG záznamu. U exponované osoby se může objevit **neschopnost jasného myšlení** a **porucha koncentrace**. Infrazvukové vlnění může ovlivnit také schopnost vidění. Poruchy vidění, v důsledku **rezonance oka**, byly pozorovány pro frekvence od 1 až do 90 Hz. [35], [60]

Vliv nízkofrekvenčního hluku na lidský organismus, zejména v rozsahu 20 až 100 Hz, je podle výzkumů mnohem významnější než hluk o infrazvukových frekvencích. Účinky nízkofrekvenčního hluku na člověka jsou obdobné jako u působení infrazvuku. Jedná se především o nespecifické fyziologické reakce, subjektivní obtíže (nepohodlí, stres atd.) a zhoršení výkonnosti exponovaných osob.[45], [76]

Ve většině případů je přímé měření a hodnocení míry, do jaké je hluk obtěžující, poměrně složité. Je to z důvodu více proměnných faktorů, než jen fyzikálně měřitelných akustických proměnných. Během realizace studií, které jsou zaměřeny na zjišťování vlivu hluku na člověka, je důležitým aspektem také návrh vhodné dotazovací metody, která je následně aplikována na zkoumané subjekty. [45]

S vlivem zvuku na člověka souvisí i pojem psychoakustika<sup>2</sup>. Je to vědní obor, který se zabývá percepcí zvuku lidským mozkem. Poznatky z psychoakustiky jsou využívány například v oblasti kontroly kvality zvuků u produktů (např. v automobilovém průmyslu), které musí splňovat určité vlastnosti, aby neměly na zákazníka negativní vliv. Zde jsou pak zaváděny akustické metriky jako ostrost (angl. *sharpness*), hlasitost (angl. *loudness*), drsnost (angl. *roughness*) nebo kolísavost (angl. *fluctuation strength*) zvuku. [20], [35], [36], [37]

### 3.3 Expoziční limity pro infrazvuky a nízkofrekvenční zvuky

Hluk je jedním z významných faktorů negativně ovlivňujících životní prostředí a kvalitu zdraví člověka. V mnoha vyspělých zemích byla kvůli škodlivým účinkům hluku zavedena legislativní opatření, v podobě zákonů, norem a jiných právních předpisů, která jsou určena k zajištění ochrany osob před nadměrným hlukem a vibracemi. Tato opatření se týkají jak oblasti komunální hygieny, tak i pracovního prostředí. [3]

V roce 1996 byla Evropskou unií vypracována „Zelená kniha o příští hlukové politice EU“ (Green Paper on Future EU Noise Policy), na jejímž základě byla napsána Směrnice Evropského parlamentu a Rady č. 2002/49/ES „o hodnocení a řízení hluku ve venkovním prostředí“. V České Republice byla tato směrnice zavedena do zákona č. 258/2000 Sb., „o ochraně veřejného zdraví a o změně některých souvisejících zákonů“, část směrnice pak byla transponována do vyhlášky č. 523/2006 Sb., „o hlukovém mapování“. Na základě této vyhlášky, jsou pak Ministerstvem zdravotnictví České Republiky, pořizovány strategické hlukové mapy.

Strategické hlukové mapy jsou grafické výstupy, obvykle pořizované ve výpočtové výšce 4 m ( $\pm 0,2$  m) nad terénem dané oblasti, znázorňující překročení mezních hodnot hlukového ukazatele,

---

<sup>2</sup> Podrobnější informace o psychoakustice lze najít např. v literatuře [36], [37] nebo v knize: „Základy experimentální psychoakustiky“, autor: Alois Melka.

který je stanoven pro celodenní ( $L_{dvn}$ ), denní ( $L_d$ ), večerní ( $L_v$ ) či noční ( $L_n$ ) obtěžování hlukem. Také se může jednat o diferenční mapy, na kterých je stávající hluková situace porovnávána s různými možnými budoucími situacemi. Hlukové ukazatele jsou stanoveny výpočtem s využitím znalosti dlouhodobých (ročních) průměrných hodnot hladin akustického tlaku váženého funkcí A, a udávají se v hodnotách decibelů. Z toho důvodu je v těchto hlukových mapách zahrnut pouze hluk, který má z frekvenčního hlediska, charakter nízkofrekvenčních a slyšitelných zvuků. V následující tabulce jsou uvedeny limitní hodnoty pro jednotlivé hlukové ukazatele. [63], [64]

**Tab. 2** Mezní hodnoty pro hlukové ukazatele  $L_{dvn}$  (den-večer-noc) a  $L_n$  (noc) [63].

Oblast	Hlukový ukazatel	
	$L_{dvn}$ (dB)	$L_n$ (dB)
<b>Železniční doprava</b>	70	65
<b>Silniční doprava</b>	70	60
<b>Letecká doprava</b>	60	50
<b>Integrovaná zařízení<sup>3</sup></b>	50	40

Dle údajů Ministerstva zdravotnictví České Republiky, které byly zveřejněny v roce 2007, je hluková zátěž naší populace v průměru ze 40 % výsledkem činnosti v pracovním prostředí a z 60 % je způsobena aktivitami v mimopracovním prostředí. V České Republice je platné nařízení vlády 272/2011 Sb. „o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací“. V tomto nařízení jsou stanoveny hygienické limity hluku a vibrací na pracovištích, hluku v chráněném venkovním prostoru i chráněném venkovním a vnitřním prostoru staveb a dále hygienické limity vibrací v chráněném vnitřním prostoru staveb. Nicméně, pro mimopracovní prostředí, dosud nejsou stanoveny hygienické limity pro působení infrazvuků a nízkofrekvenčních zvuků. Přípustný expoziční limit infrazvuku a nízkofrekvenčního zvuku, který je vyjádřen ekvivalentní hladinou akustického tlaku váženého G funkcí, je  $L_{Geq,8h} = 116$  dB, což je hodnota předepsaná pro osmihodinovou pracovní dobu. Maximální přípustný expoziční limit infrazvuku v pracovním prostředí je, při vyjádření ekvivalentní hladiny akustického tlaku v 1/3 oktávových pásmech se středními frekvencemi 1 až 16 Hz, roven hodnotě  $L_{teq,8h} = 110$  dB. Pro nízkofrekvenční zvuk je přípustný limit, vyjádřený ekvivalentní hladinou akustického tlaku v 1/3 oktávových se středními frekvencemi 20 až 40 Hz, roven  $L_{teq,8h} = 105$  dB. Při krátkodobé expozici hluku, tj. do 8 minut, který je hodnocen v hladinách maximálního akustického tlaku  $L_{tmax}$ , opět v uvedených 1/3 oktávových pásmech, je nejvyšší přípustná hodnota pro infrazvuk  $L_{tmax} = 137$  dB a pro nízkofrekvenční zvuk  $L_{tmax} = 132$  dB. Pro jinou než osmihodinovou pracovní dobu je nutné provést korekci, a to přičtením zjištěné korekční hodnoty  $K_T$  ke zmiňovaným hodnotám  $L_{Geq,8h}$  nebo  $L_{teq,8h}$ . Korekce  $K_T$  je vypočtena dle vztahu:

$$K_T = 10 \log(480/T) \quad (12)$$

$K_T$  (dB)...korekce,

<sup>3</sup> Stacionární technická jednotka, ve které probíhá jedna či více konkrétních průmyslových činností nebo stacionární

$T$  (min)...délka pracovní směny.

V pracovním prostředí, kde je pracovní doba delší/kratší než 8 hodin, je tedy snížen/zvýšen přípustný expoziční limit pro infrazvuk a nízkofrekvenční zvuk.

V současnosti nejsou k dispozici české ani americké nebo mezinárodní normy, které by definovaly přípustné expoziční limity pro infrazvuk pro jiné než pracovní prostředí.

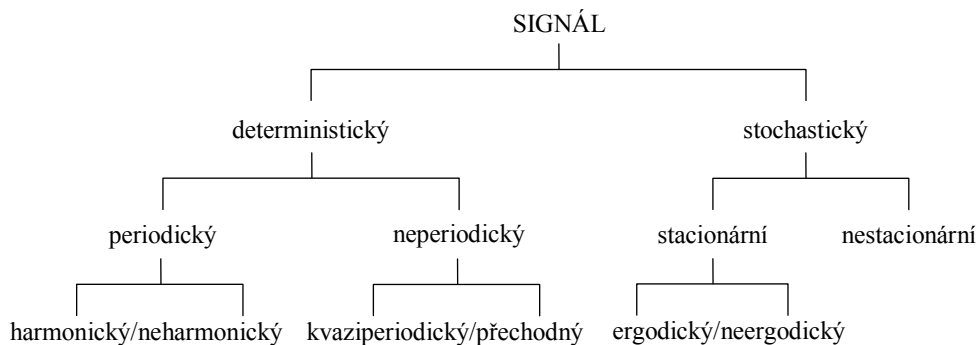
[61], [62], [63]

## 4 Zvukový signál a jeho zpracování

Signál obecně je funkce jedné či více proměnných a měřitelných veličin v čase nebo v prostoru. Je nositelem informace, přičemž daná informace je nehmotná, avšak přenášena prostřednictvím hmotného tedy reálně existujícího nosiče, např. fyzikální veličiny. Přenášená data vypovídají o stavu a dynamice systému, který je generuje. Obsahují jak užitečnou informaci, která je přímo spojena s měřeným reálným objektem, tak také nepotřebnou informaci, která je označována jako šum. Množství informací, které je v signálu obsaženo, je nutné posuzovat ve vztahu k osobě, která ji přijímá. Tedy jedná se zde o relativní vztah, který je charakteristický tzv. mírou neurčitosti, tj. čím méně je příjemce seznámen s obsahem přenášené zprávy, tím větší má pro něj výslednou vypovídací hodnotu. [8], [27]

Signály lze dělit podle různých kritérií. Jedním ze základních je rozdělení podle matematického popisu, kdy jsou rozlišovány signály deterministické nebo stochastické. Deterministické signály jsou signály přesně určené, které lze explicitně matematicky popsat. Ve výsledku tedy tento typ signálu nese nulové množství informace. Stochastické neboli náhodné signály, jak je evidentní z názvu, jsou signály vyskytující se nahodile. Je možné je popsat pouze pravděpodobností výskytu a statistickými momenty. Deterministický signál je zpravidla v různém poměru smíšen s náhodným signálem. Většina skutečných signálů je stochastického typu. [8], [26], [29]

Deterministický i náhodný signál lze dále dělit například podle schématu na obr. 12.



Obr. 12 Rozdělení signálů podle matematického popisu. [26]

Další dělení stochastických signálů, které není uvedeno ve schématu, ale které je potřeba zmínit, je na signály úzkopásmové a širokopásmové. Ve spektru úzkopásmových signálů se objevuje pouze jeden vrchol. Tento druh signálu je tvořen harmonickými signály s frekvencemi z úzkého pásma a v jeho časovém průběhu je tvořen kmity o málo proměnné frekvenci, ale s nahodile se měnící amplitudou. Širokopásmový signál se skládá z harmonických signálů s frekvencemi z širokého pásma frekvencí. Takovéto signály jsou zcela náhodné a lze mezi ně zařadit také šum. [26]

V některých případech je klasifikace signálu závislá na době jeho trvání. Průběh stejného signálu se může za kratší časový interval jevit jako proměnný, ale při delším časovém pozorování, lze již jeho charakter průběhu považovat za ustálený. [26]

Kromě uvedeného rozdělení, lze dále rozpoznávat signály skalární a vektorové, reálné a komplexní, sudé a liché, nebo jednorozměrné a vícerozměrné. Zvukový signál je ve své podstatě

jednorozměrný stochastický signál. Lze jej tedy charakterizovat jako náhodně se vyskytující signál v čase, přičemž čas je veličinou nezávisle proměnnou. Závislou proměnnou pak může být například akustický tlak. [8]

Zvukový signál představuje zvukové vlnění, které se jako tlakové fluktuace ve vzduchu neustále mění. Tudíž zvukový signál je kromě zmiňovaných vlastností ještě signálem spojitým v čase i hodnotách a tedy tzv. analogovým signálem.

Stolní osobní počítače či notebooky jsou číslicové počítače, které pracují se signály v podobě čísel. Tedy i samotný software, včetně programového prostředí MATLAB, je primárně nástrojem sloužícím pro zpracovávání číslicových signálů. Proto nelze analogové signály ihned počítačově zpracovávat, ale nejprve je nutné jejich převedení do číslicové podoby, tj. digitalizace, čímž je získán signál diskrétní v čase i hodnotách. [11]

## 4.1 Digitalizace zvukového signálu

Proces digitalizace lze provést prostřednictvím A/D převodníku, který realizuje operace vzorkování, kvantování a kódování signálů.

**Vzorkováním** lze získat vzorky původního analogového signálu, nejčastěji v určitých pravidelně se opakujících časových intervalech, neboli číslicový signál jako časovou posloupnost vzorků. Vzorkování lze tedy označovat za diskretizaci spojitého signálu v čase. Nejdůležitějšími parametry jsou zde vzorkovací perioda  $T_{vz}$  a vzorkovací frekvence  $f_{vz}$ . Vzorkovací perioda je vzdálenost (doba) mezi jednotlivými sousedními vzorky v sekundách a vzorkovací frekvence je její převrácená hodnota udávaná v jednotkách Hertz.

Pro realizaci korektního vzorkování je nutné dodržet Shannon-Kotělníkův (Nyquistův) vzorkovací teorém, kdy zvolená vzorkovací frekvence  $f_{vz}$  musí být větší, než dvojnásobek frekvence nejvyšší harmonické složky, obsažené ve vzorkovaném signálu, což lze vyjádřit vztahem (13):

$$f_{vz} > 2f_{max} \quad (13)$$

kde

$f_{max}$  (Hz)...maximální frekvence v signálu.

Pouze při dodržení vzorkovacího teorému je následně možná přesná rekonstrukce spojitého, frekvenčně omezeného signálu z jeho vzorků bez aliasingu<sup>4</sup>.

[10], [12], [27], [43]

V současné době jsou v oblasti zpracování audio signálů používány nejrůznější vzorkovací frekvence, které jsou závislé na konkrétní aplikační oblasti. Například ve zvukoměrné technice jsou při ukládání zvukových signálů do formátu WAVE nejčastěji používány vzorkovací frekvence 8 kHz, 12 kHz, 16 kHz, 24 kHz, 48 kHz aj.

**Kvantování** je proces, kterým jsou spojitě hodnoty veličin v tzv. kvantizéru, který je součástí A/D převodníků, převedeny na hodnoty diskrétní. Kvantování je realizováno z důvodu konečného rozlišení A/D převodníku  $2^N$ , kde tato hodnota udává počet možných kvantizačních hladin a  $N$

---

<sup>4</sup> Aliasing je nežádoucí jev, kdy je vlivem nedodržení vzorkovacího teorému původní frekvence vzorkovaného signálu nahrazena jinou frekvencí.

representuje kolika bitový převodník je pro digitalizaci využit. Například 8bitový A/D převodník je schopen konvertovat hodnoty vstupního rozsahu do  $2^8$ , tj. 256 výstupních hodnot - hladin. Vzdálenost dvou kvantizačních hladin se nazývá kvantizační krok  $\Delta$  a udává rozlišení převodníku. Lze jej vypočítat dle následujícího vztahu (14):

$$\Delta = \frac{x_{max} - x_{min}}{2^N} \quad (14)$$

kde

$x_{max}$  ... maximální hodnota vstupního signálu,

$x_{min}$  ... minimální hodnota vstupního signálu.

Proces kvantování může být, buď lineární, kdy je řízen tzv. rozhodovacími úrovněmi, které se nacházejí v polovině vzdálenosti mezi jednotlivými kvantizačními hladinami, nebo nelineární. Kvantování lze provádět jak unipolární, kdy se převádějí hodnoty z intervalu  $\langle 0, x_{max} \rangle$ , tak i bipolární, kdy dochází ke konverzi hodnot z intervalu  $\langle -x_{max}, x_{max} \rangle$ . Kvantování je vždy zatíženo kvantizační chybou a doprovázeno kvantizačním zkreslením neboli šumem.

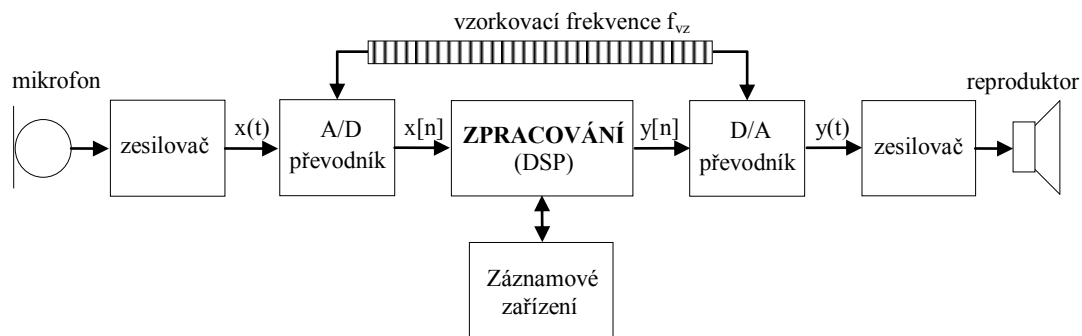
Velmi důležitý je výběr vhodného kvantizéru s dostatečným počtem kvantizačních hladin. Zvolený rozsah je závislý především na amplitudě vstupních vzorků signálu, která nesmí přesáhnout nevyšší kvantizační úroveň danou kvantizérem. Pokud by nebyl tento předpoklad dodržen a došlo by k přebuzení přístroje vstupním signálem, signál by byl při následném převodu zpět do analogové podoby omezený a tedy tvarově zkreslený.

[12], [17], [24], [27], [29], [43]

**Kódování** je proces, kterým je signál kódován do binární podoby. Ve výsledku je tedy každé kvantizační hladině kvantovaného signálu přiřazeno binární číslo a celý signál je tak tvořen posloupností 1 a 0. [13]

Základním způsobem digitalizace zvukového signálu je PCM – pulzní kódová modulace.

Na obr. 13 je zobrazen zjednodušený princip zpracování zvukového signálu v počítači. Analogový akustický signál je prostřednictvím mikrofonu, který představuje akustický měnič, přiveden na vstup A/D převodníku zvukové karty. Zde je signál konvertován na digitální signál ve formě posloupnosti čísel. Číslcová audio data je tak možno dále zpracovávat na PC, případně jiném záznamovém zařízení.



**Obr. 13** Zjednodušené blokové schéma zpracování zvukového signálu v počítači. [4], [7], [23]



Zvuková data, která vystupují z A/D převodníku jsou tzv. RAW data, v překladu „surová“ či „nezpracovaná“ data, která je třeba uložit v některém ze standardizovaných komprimovaných nebo nekomprimovaných formátů.

Pro přehrávání záznamu jako zvuku je nutné posloupnost kódovaných dat zpětně převést do analogové podoby. V tomto případě je využit vstup D/A převodníku zvukové karty.

Digitalizované signály mají oproti analogovým jisté výhody, jako je snadné uchování získaných dat, provedení neomezeného počtu kopií původního záznamu a možnost dalšího zpracování. Na rozdíl od audio signálů uložených v analogové podobě, nedochází opakovaným přehráváním ke snížení kvality. Nevýhodou digitalizace je ztráta části původní informace, kterou lze však vhodně zvolenými parametry minimalizovat. [13], [18]

Hlavním přístupem při zpracování dat je v současnosti používání DSP algoritmů. Název je zkratka anglických slov Digital Signal Processing (příp. Digital Signal Processor), což v překladu znamená číslicové zpracování signálu. Jedná se tedy o operace se vzorkovaným signálem, které zahrnují převzorkování signálu, filtrace, matematickou manipulaci s daty, transformace a také komprese a zpětné dekomprese dat. [24]

Důležitým faktem, který je potřeba zohlednit, je nepřesnost celého procesu konverze signálu. To, co člověk slyší, jsou zvukové vlny dopadající na ušní bubínek. Tyto zvukové vlny, zaznamenané v podobě číselných dat prostřednictvím techniky, však procházejí skrze několik systémů, čímž je ovlivněna přesnost jejich reprodukce. Mikrofony a zesilovače přidávají do signálu šum a zkreslení. A/D převodníky dodávají chyby nelinearity, šum, zkreslení a zavádějí také chybu kvantování. Výsledkem pak může být číselná posloupnost vzorků, která nemusí odpovídat reálnému zvuku. Míru nepřesnosti lze určitým způsobem ovlivnit použitým přístrojovým vybavením, avšak kvůli přítomnosti šumu jsou i vysoce precizní měření a analýzy zatíženy chybou. [22]

## 4.2 Přístup ke zpracování zvukového signálu

Zvukový signál lze považovat za stochastický, tedy náhodně se vyskytující signál v čase. Většina reálných technických signálů je navíc zařazována do oblasti nestacionárních<sup>5</sup> signálů. V případě frekvenční analýzy nestacionárních signálů za použití Fourierovy transformace, která je vhodná zejména pro zpracování stacionárních signálů, lze získat pouze frekvenční složky obsažené v celém signálu. Pokud je potřeba získat přehled o časovém výskytu frekvenčních komponent nestacionárních nebo přechodných signálů, je nutné zvolit pro analýzu některou z tzv. časově frekvenčních transformací, například krátkodobou Fourierovu transformaci (angl. *Short Time Fourier Transform*, zkr. *STFT*), waveletovou transformaci (angl. *Wavelet transform*, zkr. *WT*, nazývanou někdy jako vlnkovou) nebo Cohenovy transformace.

U některých z těchto přístupů je vyžadováno rozdělení signálu na kratší úseky nebo úseky s podobnými vlastnostmi. Toto dělení se nazývá segmentace signálu. Segmentace signálu je prováděna do určitého počtu rámců (oken). Aby nedošlo ke ztrátě informace mezi ostrými

---

<sup>5</sup> Nestacionární signály mají střední hodnotu a funkci hustoty pravděpodobnosti závislou na konkrétním časovém okamžiku. Naproti tomu stacionární signály mají konstantní a na čase nezávislou střední hodnotu a hustotu pravděpodobnosti. Jejich statistické charakteristiky nejsou závislé na absolutních hodnotách času, ale pouze na délce časových intervalů mezi okamžiky  $t_1$  a  $t_2$ . [26], [58]

hranicemi rámců, je provedeno jejich překrytí, tzn., že každý nový rámec obsahuje část rámce předchozího a část rámce následujícího. Ve výsledku jsou tak vlastnosti zvuku v místě nespojitosti zachovány v následujícím rámci. Stupeň překrytí je obvykle vyjádřen v procentech, přičemž nejběžněji jsou používány hodnoty 25% a 50%. Při 50% překrytí rámců se každý prvek původního signálu objeví ve dvou rámcích. Se segmentací signálu je spojeno také využívání okenních funkcí. Vhodným výběrem vážícího okna, lze zděnit přechody mezi spojeními jednotlivých překrytých a zpracovávaných rámců. Okenní vážení je také předpokladem pro provedení frekvenční analýzy pomocí *FFT* bez výskytu prosakování energie ve spektru (angl. *leakage*). Tento jev se objevuje především při spektrální analýze periodických průběhů signálů, pokud není pro výpočet *FFT* vybrán počet vzorků, který zahrnuje celistvý počet period signálu. V případě sinusového signálu se prosakování ve spektru v pásmu od 0 Hz do Nyquistovy frekvence projeví řadou čar místo jediné.

Záznam řeči, hudební nahrávka i záznam z hlukových měření, to vše jsou zvukové signály, které však mají rozdílné vlastnosti. Vzhledem k této skutečnosti, je nutné přistupovat odlišně také k jejich rozboru a hodnocení. I když lze mnohdy použít stejné metody pro jejich analýzu, budou zde např. odlišnosti v rozdílné délce analyzovaného rámce a také v rozdílném výsledném rozsahu zkoumaného parametru.

[22], [25], [27], [44], [59]

## 5 Možnosti programu Matlab při zpracování audiosignálů

Matlab je výpočetní program, resp. technický programovací jazyk vysoké úrovně a interaktivní prostředí pro vývoj nejrůznějších algoritmů, pro vizualizaci a analýzu dat, pro tvorbu aplikací včetně grafického rozhraní a také provádění numerických výpočtů. Byl vyvinut již koncem sedmdesátých let a původně sloužil jako výpočetní program pro univerzitní účely. Během let byl celkově zdokonalen a rozšířen o mnoho funkcí. V současné době je Matlab velmi rozšířeným nástrojem aplikovaným především v technické oblasti a ekonomii, a to nejen na univerzitách. Předním vývojářem je aktuálně společnost MathWorks, která byla založena v roce 1984.

Systém Matlab se skládá z následujících několika částí:

### Nástroje na pracovní ploše a vývojové prostředí

Tato část je tvořena sadou nástrojů a vybavení, které lze využít pro zvýšení produktivity při práci se soubory a funkcemi. Jedná se o pracovní plochu, dále o hlavní příkazové okno (*Command Window*), program pro pořizování a úpravu textu (*Editor*), ladící program (*Debugger*), analyzátor kódů, prohlížeče pro zhlédnutí nápovědy (*Help*), pracovního prostoru (*Workspace*) a složek.

### Knihovna matematických funkcí

V knihovně je obsaženo značné množství výpočetních algoritmů od elementárních funkcí, jako je například součet, sinus, kosinus nebo komplexní aritmetika, k sofistikovanějším funkcím, mezi které lze zahrnout inverzní matice, Besselovy funkce a rychlou Fourierovu transformaci.

### Jazyk

Matlab je zkratkou slov Matrix Laboratory, což v překladu znamená maticová laboratoř. Základním datovým typem je tedy pole resp. matice. Další typy jako vektor, skalár a více než dvourozměrné pole jsou pouze speciální případy. Programovací jazyk je vysoké úrovně a jeho prostřednictvím lze používat příkazy pro řízení toku programu, dále nejrůznější funkce, definovat datové struktury, vstupy a výstupy programu nebo provádět objektově-orientované programování. [15]

### Grafika

V prostředí Matlab jsou k dispozici nástroje pro zobrazení vektorů a matic jako grafů, provádění jejich anotací a také tisku. Je zde možnost využití vysoko-úrovňových funkcí, jako je 2D i 3D vizualizace dat, zpracování obrazu, animace dat nebo vytvoření prezentační grafiky. Kromě zmiňovaných funkcí lze užít také nízko-úrovňové funkce, pomocí kterých lze docílit požadovaného vzhledu grafiky nebo vybudovat kompletní grafické uživatelské rozhraní (GUI).

### Externí rozhraní

Knihovna externích rozhraní je určena pro vytváření programů v jazycích C/C++ a Fortran, které spolupracují s programem Matlab.

Velkou výhodou a předností Matlabu je jeho snadné rozšíření o další, uživatelem nadefinované funkce, tzv. M-soubory (z angl. *M-file*) i o celé aplikace. K Matlabu je možné pořídit řadu specificky zaměřených nadstavb, tzv. *toolboxů*. Jedná se v podstatě o sbírku M-souborů, která je navržena pro řešení určité problematiky. [16]

Pro zpracování této kapitoly je využita zejména rozsáhlá a velmi kvalitní nápověda k programu Matlab, a to tzv. Help. Podrobné informace a pokročilá dokumentace o používání nástrojů Matlabu jsou dostupné také online na webových stránkách MathWorks: [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com).

## 5.1 Manipulace s audio daty uloženými ve formátu WAVE

V programovém prostředí Matlab jsou podporovány zvukové soubory ve formátech WAVE, AU a SND. Soubory uložené ve formátu AU (Unix Audio) jsou označovány příponou *.au* a jsou to digitální zvukové soubory vytvořené systémem UNIX. Soubory ve formátu SND (SouND) mají příponu *.snd* a jsou představitelem audio formátu používaného v počítačích společností Sun Microsystems, NeXt a Silicon Graphics. V současnosti je tento typ formátu spojován převážně s audio soubory, které ve svých aplikacích a zařízeních využívá společnost Apple Inc.

Formát WAVE (Waveform Audio Format), který byl vyvinut společnostmi IBM a Microsoft, je jedním z nejrozšířenějších standardizovaných formátů pro uložení zvukových souborů. Tento typ formátu patří mezi soubory typu RIFF (Resource Interchange File Format) a slouží jako kontejnerový soubor, do kterého lze ukládat zvuk v různých formátech a to jak nekomprimovaných (LPCM), tak i komprimovaných ( $\mu$ -Law, MP3, atd.).

Soubory uložené v tomto zvukovém formátu mají příponu *.wav* a zaznamenaný zvukový soubor obsahuje kromě vlastních dat také informace nutné pro jejich správnou interpretaci, tj. použitou vzorkovací frekvenci, počet kanálů, bitové rozlišení a další identifikátory.

V Matlabu lze audio soubory s příponou *.wav* načíst například pomocí příkazu `wavread`.

Zde je ukázka jedné z možných syntaxí: `[y, Fs, nbits] = wavread(filename);`

Prostřednictvím tohoto příkazu je do paměti načten soubor *y* specifikovaný řetězcem s názvem *filename*. Tento soubor *y* představuje vzorkovaná data, kde je každý vzorek uložen jako reálná číselná hodnota s plovoucí desetinnou čárkou a dvojnásobnou přesností. Proměnná *y* je uchována v jednom, dvou nebo více sloupcových vektorech, v závislosti na tom, zda je zvukový záznam jednokanálový (mono), dvoukanálový (stereo) nebo vícekanálový. Proměnná *Fs* vrací hodnotu vzorkovací frekvence, která byla při kódování použita a proměnná *nbits* udává počet bitů na vzorek. Příkaz `wavread` je určen pouze pro datový formát PCM a je limitován maximálním počtem 32 bitů na vzorek.

V případě, že není k dispozici požadovaný zvukový záznam, je možné jej vytvořit v Matlabu, a to například pomocí příkazu `wavrecord` nebo `audiorecorder`. Zde je požadován mikrofon, ať již integrovaný nebo připojený do požadovaného vstupu v počítači. Další způsob, jak vytvořit zvukový soubor ve formátu *.wav* je pomocí příkazu `wavwrite`, kde jsou nadefinované hodnoty vzorků uloženy do vytvořené proměnné.

U audio souboru načteného v paměti Matlabu je pro lepší interpretaci zvuku výhodné provést vizualizaci dat. K vykreslení časového průběhu se nejčastěji využívá příkazu `plot`. V případě, že je potřeba zvuková data přehrát, což je ve většině případů žádoucí, je možné využít příkazy jako `wavplay`, `sound` nebo `audioplayer`.

[22]

Zmiňované úkony jsou pouze základní analýzou, kterou lze se zvukovými soubory, resp. uloženými číslicovými daty realizovat.

Dalším postupem je již samotné zpracování zvukového signálu, tzn. filtrace, provedení požadovaných rozborů, zjištění zásadních údajů a charakteristik a jejich následné vyhodnocení. Tyto budou více popsány v dalších kapitolách.

## 5.2 Knihovna funkcí - Signal Processing Toolbox

**Signal Processing Toolbox (SPT)** software je sbírka nástrojů, které lze spustit v prostředí Matlab. Tuto knihovnu lze využít pro širokou škálu operací zpracování signálu, zahrnujících generování průběhů signálů, návrhy filtrů a jejich implementace, dále parametrické modelování a spektrální analýzu. Knihovna je rozdělena na dvě kategorie nástrojů – funkce nebo objekty pro programování v příkazové řádce a grafické uživatelské rozhraní.

Pro programování v příkazové řádce jsou k dispozici funkce pro následující aplikace:

- návrh, analýza a implementace diskrétních filtrů,
- návrh, analýza a implementace analogových filtrů,
- systémy lineárních transformací,
- okenní funkce,
- spektrální analýza a kepsrální analýza,
- statistické zpracování signálu,
- parametrické modelování,
- lineární predikce,
- generování průběhu signálů.

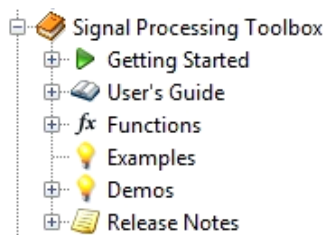
Kategorie nástrojů pro GUI je určena pro vytváření interaktivních grafických uživatelských rozhraní, prostřednictvím kterých lze realizovat následující problematiku:

- návrh a analýza filtrů,
- návrh a analýza oken, resp. okenních funkcí,
- vykreslení a analýza signálů, spektrální analýza a filtrace.

Jediným datovým typem, který je SPT podporován, je typ double-precision, tj. reálné číslo s plovoucí desetinnou čárkou, resp. tečkou a dvojnásobnou přesností. Pokud jsou vstupy jiného datového typu např. single-precision (reálné číslo s plovoucí desetinnou čárkou a jednonásobnou přesností) nebo celočíselného typu s pevnou desetinnou čárkou (integer), nelze očekávat správné výsledky a v mnoha případech se objeví také chyba programu. Využití datového typu single-precision s plovoucí řádovou čárkou nebo typu s pevnou řádovou čárkou je umožněno pouze u knihovny pro návrh filtrů (Filter Design Toolbox) ve spojení s nástrojem Fixed-Point Toolbox.

Důležitou součástí programu Matlab je rozsáhlá nápověda pro práci se všemi dílčími knihovnami. SPT má stejně jako ostatní integrované knihovny nápovědu rozdělenou do několika adresářů (složek), které obsahují další dílčí podadresáře a dohromady tak tvoří přehlednou a logicky uspořádanou stromovou architekturu (obr. 14). V šesti složkách jsou zahrnuty úvodní informace,

uživatelská příručka, funkce, příklady, ukázky programů a poznámky týkající se aktualizace knihovny v různých verzích programu. Stejným způsobem jsou členěny i další knihovny Matlabu.



**Obr. 14** Ukázka uspořádání nápovědy pro SPT v Matlabu.

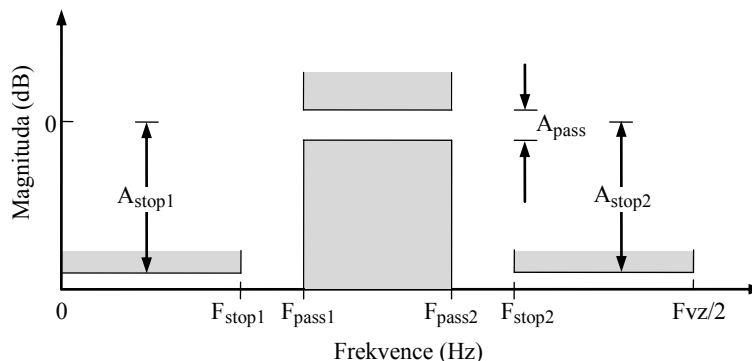
V případě, že knihovna SPT není k dispozici, je možné ji jako modul k základnímu jádru Matlabu dokoupit. Její přítomnost není pro práci se signály nezbytná, avšak pro plné využití všech možností a funkcí je její použití výhodnější. Dostupnost knihovny lze zjistit zadáním příkazu `ver` do hlavního příkazového okna programu. Potvrzením pomocí klávesy Enter je získána odezva systému a zobrazen přehled nainstalovaných modulů (včetně verze), dále konkrétní verze daného systému Matlab, licenční číslo, operační systém a verze Java VM (Virtual Machine). [8]

### 5.2.1 Návrh, implementace a analýza filtrů

V případě návrhu filtru se vždy jedná o stanovení koeficientů daného filtru, které je nutné volit na základě specifických požadavků filtrování. Později je na tyto koeficienty aplikována konkrétní, vhodně zvolená struktura filtru, čímž je provedena implementace filtru. Teprve po návrhu a implementaci filtru lze provést vlastní filtraci dat.

Filtr je navrhován zejména pro potřebu změny frekvenčního obsahu signálu, např. odstranění některých frekvenčních složek nebo neužitečného signálu (šumu). Při návrhu filtru prostřednictvím SPT je možné využít dva přístupy programování – objektově orientovaný a neobjektově orientovaný neboli tzv. procedurální přístup. Objektově orientované programování je výhodnější používat při tvorbě rozsáhlejších softwarových aplikací. Nejprve je vytvořen objekt typu filtr (příkaz `fdesign`) a následně je vyvolána požadovaná metoda návrhu (příkaz `design`).

Příkaz `fdesign` lze využít k návrhu nejrůznějších typů filtrů jako je dolnoproustný, hornoproustný filtr, filtr typu pásmová propust aj.



**Obr. 15** Náhled specifikací filtru typu pásmová propust.

Pro návrh filtru typu pásmové propusti (obr. 15) je nutné upřesnit následující specifikace:

<code>A_stop1</code>	útlum v prvním nepropustném pásmu (v dB)
<code>F_stop1</code>	mezní frekvence prvního nepropustného pásma (v Hz)
<code>F_pass1</code>	dolní mezní frekvence propustného pásma (v Hz)
<code>F_pass2</code>	horní mezní frekvence propustného pásma (v Hz)
<code>F_stop2</code>	mezní frekvence druhého nepropustného pásma (v Hz)
<code>A_stop2</code>	útlum v druhém nepropustném pásmu (v dB)
<code>A_pass</code>	povolené zvlnění v propustném pásmu (v dB)

Vypsané specifikace jsou následně předány metodě `fdesign` jako parametry:

```
PPObjekt = fdesign.bandpass('Fst1, Fp1, Fp2, Fst2, Ast1, Ap, Ast2', ...  
F_stop1, F_pass1, F_pass2, F_stop2, A_stop1, A_pass, A_stop2, Fvz);
```

Parametr `Fvz`, který je také potřeba definovat, je vzorkovací frekvence.

Pro vytvoření objektu je nutné zjistit dostupné metody návrhu filtru, a to prostřednictvím volání funkce `designmethods`. Teprve nyní je možné provést samotný návrh filtru pomocí příkazu `design`. Například pro vytvoření filtru typu Butterworth bude použita následná syntaxe:

```
PPFiltr = design(PPObjekt, 'butter');
```

Takto navržený filtr je možné dále zobrazit prostřednictvím interaktivního prostředí `fvttool` (Filter Visualization Tool). Jedná se o grafické vizualizační prostředí, ve kterém je možné prohlížet, upravovat či tisknout grafy se zobrazenou odezvou daného filtru. Další možností, jak zobrazit frekvenční charakteristiku filtru, je využít příkaz `freqz`.

Nakonec lze aplikovat filtr na konkrétní signál, tzn. provést filtraci signálu příkazem `filter`, pomocí kódu: `Filtrovany_signal = filter(PPFiltr, Puvodni_signal);`

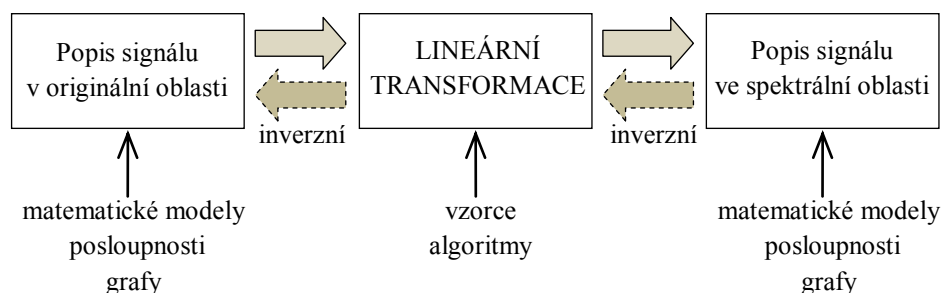
Další možností, jak navrhnout konkrétní filtr je využít interaktivní grafické prostředí `fdatool` (Filter Design and Analysis Tool) nebo `filterbuilder`.

### 5.2.2 Spektrální analýza

Úkolem spektrální analýzy je pomocí výpočtů zjistit složky spektra zpracovávaného signálu, a to na základě znalosti průběhu signálu v originální oblasti, kterou je obvykle čas. Spektrum signálu je vyjádření rozložení amplitud a počátečních fází jednotlivých harmonických složek, ze kterých je daný signál složen, v závislosti na frekvenci. V rámci analýzy zvukových signálů realizované v této práci má význam pouze amplitudové spektrum. Přehled fází neboli fázové spektrum má uplatnění např. při analýze zvuků získaných z intenzitních měření.

Pro stanovení spektra signálu je potřeba na originální signál, resp. originální posloupnost vzorků aplikovat některou z lineárních transformací. Využitím příslušného výpočetního vztahu či algoritmu pro zvolenou transformaci lze získat požadované složky spektra signálu. Výhodami těchto lineárních transformací je možnost jejich použití na libovolný typ signálu a také možnost provedení inverzní operace, tj. inverzní lineární transformace, ze které lze opět rekonstruovat průběh signálu v originální oblasti (obr. 16).

[1], [2], [8], [27]



**Obr. 16** Znázornění dvojího popisu signálu – v originální oblasti a spektrální oblasti. [8]

Lineárních transformací je několik druhů, přičemž některé z nich jsou využívány častěji než jiné. Spektrální popis se liší v závislosti na použité transformaci. Každou transformaci lze tedy získat různou matematickou a fyzikální interpretaci spektra.

Lineární transformace lze aplikovat, jak na analogový signál (lineární integrální transformace), tak také na číslicový signál (lineární diskrétní transformace).

Mezi nejznámější a nejpoužívanější lineární transformace patří:

- Fourierova transformace,
- Hadamardova transformace,
- Walshova transformace,
- Haarova transformace,
- Transformace „Z“,
- Vlnková transformace,
- Kosinová transformace aj.

Při zpracování audio signálů je pro frekvenční analýzu využívána výhradně **Fourierova transformace** (angl. *Fourier Transform*, zkr. *FT*), resp. její algoritmus rychlá Fourierova transformace (angl. *Fast Fourier Transform*, zkr. *FFT*). Obecně je *FT* řazena k nejpoužívanějším lineárním transformacím pro kmitočtový rozbor signálů.

K rozložení spektra se u každé transformace využívají tzv. bazické funkce splňující určité vlastnosti. U Fourierovy transformace jsou těmito základními funkcemi harmonické funkce – sinus, kosinus, lépe řečeno komplexní exponenciála.

Při zpracování číslicových signálů je využívána tzv. diskrétní Fourierova transformace (angl. *Discrete Fourier Transform*, zkr. *DFT*) nebo již zmiňovaná *FFT*. V těchto případech je výsledné spektrum pouze odhadem původního spektra analogového signálu před jeho digitalizací.

SPT poskytuje několik algoritmů pro výpočet odhadu spektra. Lze využít objektově orientované programování a vytvořit nejprve objekt `h = spectrum.estmethod`, kde `h` je objekt popisující metodu spektrálního odhadu `estmethod`, např. `h = spectrum.periodogram`. Následně jsou data a vytvořený objekt předány zvolenému algoritmu spektrálního odhadu např. `psd`. V tomto případě je algoritmus `Hpsd = psd(h,data)` určen k výpočtu odhadu spektrální výkonové hustoty (angl. *Power Spectral Density*, zkr. *PSD*) dat (`data`) metodou periodogramu (`h`). Tyto odhady spektra, které využívají pro výpočet *FT*, jsou v Matlabu řazeny do skupiny metod pro statistické zpracování signálů.



V Matlabu lze, u jednodimenzionálních i vícedimenzionálních signálů, provést *DFT* algoritmem *FFT*, a to pomocí vestavěné funkce `fft`.

Zde je uveden výběr dvou ze čtyř možných syntaxí.

```
Y = fft(x);
```

```
Y = fft(x, k);
```

Funkcemi `Y = fft(x)` a `y = ifft(X)` lze realizovat transformaci a inverzní transformaci vektorů o délce  $N$  dle rovnic (15) a (16):

$$X(k) = \sum_{j=1}^N x(j) \omega_N^{(j-1)(k-1)} \quad (15)$$

$$x(j) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X(k) \omega_N^{-(j-1)(k-1)} \quad (16)$$

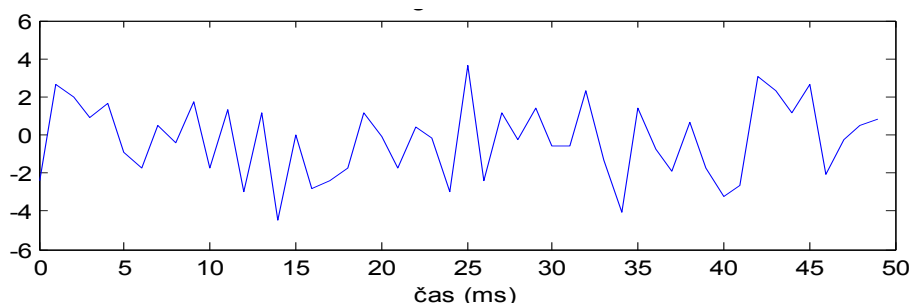
kde  $\omega_N = e^{(-2\pi i)/N}$ .

`Y = fft(x)` vrací výsledek diskretní Fourierovy transformace (*DFT*) vektoru  $x$ , která je realizovaná algoritmem *FFT*. V případě, že  $x$  je matice, je touto funkcí provedena *FT* každého sloupce matice.

`Y = fft(x, k)` vrací  $k$ -bodovou *DFT*. Jestliže je délka  $x$  menší než délka  $k$ , pak je vektor  $x$  doplněn až do délky  $k$  nulami. Jestliže je délka  $x$  větší než  $k$ , pak je posloupnost  $x$  zkrácena. Pokud je  $x$  maticí, upraví se délka sloupců stejným způsobem.

Běžně je Fourierova transformace použita pro nalezení frekvenčních složek zašuměného signálu v časové doméně. Právě na takovém signálu je možné uvést příklad využití *FT*, resp. *FFT*.

Lze uvažovat signál  $y$ , který byl vzorkován frekvencí 1000 Hz. Jedná se o signál složený ze dvou sinusových signálů o frekvenci 50 Hz a amplitudě 0,7 a frekvenci 120 Hz a amplitudě 1, ke kterému je přidán náhodný souměrný šum s nulovou střední hodnotou. Na obr. 17 je zobrazen daný signál a z jeho průběhu je velmi obtížné určit jeho frekvenční složky. Proto je signál  $y$  nutné převést prostřednictvím *FFT* do frekvenční domény.



**Obr. 17** Ukázka signálu ukrytého v šumu.

Na následujících řádcích je ukázána možná podoba kódu, po jehož spuštění je vykreslen nadefinovaný signál v čase a vypočítáno odpovídající jednostranné amplitudové spektrum.

```
%% Signál v čase
```

```
Fvz = 1000;
```

```
% vzorkovací frekvence
```

```
T = 1/Fvz;
```

```
% vzorkovací interval
```

```
L = 1000;
```

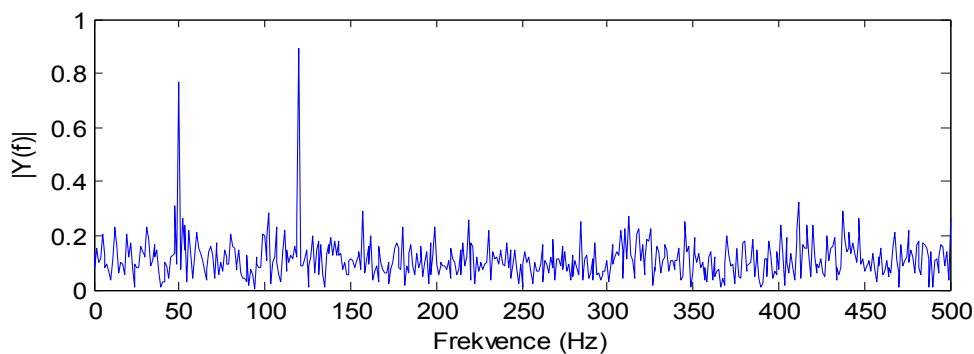
```
% délka signálu
```

```

t = (0:L-1)*T; % časový vektor
x = 0.7*sin(2*pi*50*t) + sin(2*pi*120*t); % součet sinusových signálů
y = x + 2*randn(size(t)); % složený sinusový signál včetně šumu
plot(Fvz*t(1:50),y(1:50)); % vykreslení signálu v čase
xlabel('čas (ms)'); % uvedení popisku x-osy

%% Amplitudové spektrum
k = 2^nextpow2(L); % nalezení vyššího mocnitele základu 2
Y = fft(y,k)/L; % k-bodová FFT signálu y
f = Fvz/2*linspace(0,1,k/2+1); % vytvoření lineární frekvenční osy
plot(f,2*abs(Y(1:k/2+1))); % vykreslení amplitudového spektra
xlabel('Frekvence (Hz)'); % uvedení popisku x-osy
ylabel('|Y(f)|'); % uvedení popisku y-osy

```



Obr. 18 Jednostranné amplitudové spektrum signálu  $y(t)$ .

Z obr. 18 lze vyčíst, že amplitudy nemají přesně hodnotu 0,7 a 1. Je to právě z důvodu přítomného šumu. Jelikož je šum náhodný, bude při dalších spuštěních kódu hodnota amplitud pokaždé odlišně aproximována k hodnotě 0,7 a 1. Dalším důvodem je to, že signál je konečné délky. Zvýšením délky  $L$  signálu lze docílit mnohem lepšího přiblížení se daným hodnotám.

Pokud je nutné získat původní signál v časové oblasti, je aplikována inverzní Fourierova transformace *IFFT*. V Matlabu je pro tuto operaci vyhrazen příkaz `ifft`, který může být zadán např. následujícím způsobem.

```

y = ifft(X)
y = ifft(X,k)

```

`y = ifft(X)` vrací výsledek inverzní *DFT* vektoru  $X$ , která je realizovaná algoritmem *FFT*.

V případě, že  $X$  je matice, je touto funkcí provedena inverzní *FT* každého sloupce matice.

`Y = ifft(X,k)` vrací  $k$ -bodovou inverzní *DFT*.

S Fourierovou transformací souvisí také funkce `abs(X)` a `angle(X)`.

Příkaz `abs(X)` je určen pro výpočet absolutní hodnoty nebo modulu komplexního čísla, který lze vyjádřit výrazem  $\sqrt{\text{real}(X)^2 + \text{imag}(X)^2}$ , resp. `sqrt(real(X).^2 + imag(X).^2)`.

Funkce `angle(X)` slouží pro výpočet fázového úhlu v radiánech (mezi  $\pm\pi$ ) a lze ji také přepsat do tvaru `imag(log(z))` nebo `atan2(imag(z), real(z))`.

Dalšími používanými variantami příkazu `fft` jsou například `fftshift`, `fft2`, `ifft2`. Podrobnější popis těchto funkcí je možné nalézt např. v nápovědě přímo v programu Matlab.

### 5.2.3 Cepstrální analýza

Cepstrální analýza je určena pro výpočet cepster signálu. Název cepstrum vzniklo přetvořením slova spektrum. Cepstrum má však na rozdíl od spektra na vodorovné ose jednotu času (s). Definice cepstra existuje několik a jsou navzájem částečně odlišné. Například lze cepstrum  $C_{xx}(\tau)$ , resp. výkonové autocepstrum signálu definovat předpisem (17):

$$\log(S_{xx}(f)) \xrightarrow{FT^{-1}} C_{xx}(\tau) \quad (17)$$

Jedná se tedy o inverzní Fourierovu transformaci logaritmu výkonové spektrální hustoty (*PSD*)  $S_{xx}(f)$ , která bývá označována také jako autospektrum, odtud je také odvozen název autocepstrum. Jelikož je logaritmus *PSD* funkce kladná reálná a sudá (shodné hodnoty pro záporné i kladné frekvence), je také funkce  $C_{xx}(\tau)$  reálná sudá funkce. Prakticky se však využívá a graficky znázorňuje pouze polovina časového průběhu. V něm je hledána přítomnost harmonických složek periodických a kvaziperiodických signálů. Cepstrální analýzu lze tedy využít k detekci periodicity signálu, resp. jeho spektra. V praxi je cepstrum využíváno jako prostředek k analýze řečových signálů pro stanovení základní frekvence lidské řeči nebo u akustických měření k oddělování ozvěn, např. seizmických ech, které vznikají při zemětřesení. Dále je nástrojem využívaným pro vyhodnocení strojních vibrací, na jejichž základě lze stanovit poruchu konstrukční části zařízení.

V grafu *PSD* jsou harmonické složky zobrazeny jako maxima v konkrétních frekvencích, které odpovídají celočíselnému násobku základní frekvence. V cepstru je soubor těchto harmonických složek vyjádřen pouze jediným maximem.

Je potřeba se zmínit, že s pojmem cepstrum bylo zavedeno i další speciální názvosloví pro používané veličiny, které vzniklo přetvořením původních názvů jako např. harmonické (harmonické) nebo quefrenc (frekvence).

V Matlabu lze vypočítat reálné cepstrum pomocí funkce s názvem `rceps` a syntaxe `rceps(x)`, kde  $x$  je vstupní signál. Výstupem je vektor reálných hodnot stejné délky jako vstupní data.

[26], [59]

### 5.2.4 Statistické zpracování signálů

Do metod pro statistické zpracování signálu, které se týká stochastických signálů, lze zařadit základní charakteristiky, dále tzv. statistické momenty a korelační analýzu. Tyto metody jsou aplikovány pro analýzu signálů v originální, nejčastěji časové oblasti. Ačkoliv nejsou funkce pro výpočet základních charakteristik a statistických momentů zařazeny přímo do funkcí SPT, je možné je zde také uvést.

Mezi základní určované charakteristiky lze zařadit tzv. jednobodové parametry jako např. **maximální** a **minimální hodnotu** vzorků z výběru dat, případně i s jejich umístěním (indexem).

V Matlabu jsou pro tyto charakteristiky určeny funkce `min` a `max`. Příkaz `[C,I] = max(x)`; vrací největší číselnou hodnotu  $C$  vektoru  $x$  spolu s její pozicí  $I$  v daném vektoru. Obdobně lze využít i příkaz `min`.

Mezi tzv. statistické momenty se řadí střední hodnota (obecný moment 1. řádu) a rozptyl (centrální moment 2. řádu).

**Střední hodnota**  $\mu$  vektoru  $x$  obsahujícího diskrétní data je vypočtena vzorcem (18):

$$\mu = \sum_i x_i p_i \quad (18)$$

kde

$\mu$  ...střední hodnota populace o  $N$  prvcích,

$x_i$  ...množina vzorkovaných hodnot,

$p_i$  ...pravděpodobnost výskytu dané hodnoty.

V případě, že je zjišťována střední hodnota  $\mu$  stacionárního náhodného signálu, jehož hustota pravděpodobnosti<sup>6</sup> není závislá na čase a který je uložen v podobě vzorkovaných dat délky  $N$ , tzn., že je k dispozici pouze jeho jediná realizace (zaznamenaný časový průběh), lze všechny vzorkované hodnoty považovat za statistický výběr se stejnou pravděpodobností výskytu  $p_i$ . Tuto pravděpodobnost je pak možno vyjádřit jako  $p_i = 1/N$  a výpočet střední hodnoty se stává výpočtem běžného aritmetického průměru souboru dat, dle vztahu (19):

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i \quad (19)$$

kde

$N$  ...délka analyzovaných dat.

Pokud je určována střední hodnota výběru vzorků z populace, je většinou střední hodnota označována symbolem  $\bar{x}$ . V případě, že je střední hodnota souboru více realizací shodná, jsou tyto signály označovány jako ergodické a celý soubor lze při výpočtu charakteristik nahradit pouze jednou realizací. V případě, že je pro výpočet střední hodnoty k dispozici pouze jedna realizace náhodného procesu a není znám či zaručen předpoklad ergodicity, je výsledkem jen více či méně přesný odhad střední hodnoty daného signálu. Jednotka střední hodnoty je stejná jako jednotka signálu. [8], [26], [59]

Pro zjištění **rozptylu**  $\sigma^2$  neboli disperze stacionárních signálů je platný stejný předpoklad o ergodicitě jako u výpočtu střední hodnoty. U stacionárního signálu lze vypočítat rozptyl přímo z jeho časového průběhu, s využitím znalosti střední hodnoty, dle následující rovnice (20):

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (x_i - \bar{x})^2 \quad (20)$$

kde

$\sigma^2$  ...rozptyl populace o  $N$  prvcích,

$\bar{x}$  ...střední hodnota vzorkovaných hodnot;

$x_i$  ... $i$ -tá hodnota z množiny vzorkovaných hodnot,

Jednotka rozptylu je kvadrátem jednotky konkrétního signálu. Rozptyl je využíván k hodnocení rozptýlenosti hodnot náhodné veličiny v časovém okamžiku  $t$  kolem střední hodnoty  $\mu$ . Někdy je při popisu signálu zaváděna místo rozptylu tzv. směrodatná odchylka  $\sigma$  (směrodatná odchylka populace), resp.  $s$  (výběrová směrodatná odchylka), která je odmocninou rozptylu. [8], [59]

---

<sup>6</sup> Hustotu pravděpodobnosti diskretní náhodné veličiny (NV) lze chápat jako množinu elementárních pravděpodobností  $p_i$  (pravděpodobnostní funkce), která popisuje rozdělení pravděpodobnosti NV. [59]

V Matlabu jsou pro výpočet střední hodnoty (angl. *mean*) a rozptylu (angl. *variance*), resp. směrodatné odchylky (angl. *standard deviation*) signálu určeny příkazy: `mean`, `var` a `std`.

Prostřednictvím **korelační analýzy** lze zjistit míru závislosti náhodných souborů dat, které jsou vzájemně posunuty o čas  $\tau$ . V případě, že je posuzována závislost dvou rozdílných reálných signálů  $x(t)$  a  $y(t)$  v čase, jedná se o křížovou korelaci (angl. *cross-correlation*) či vzájemnou korelační funkci. Pokud je prováděna korelační analýza téhož signálu  $x(t)$  neboli korelace daného signálu sebou samým, je tento proces označován jako autokorelace (angl. *autocorrelation*) či autokorelační funkce. V rámci zpracování této práce a analýzy jednotlivých zadaných audio signálů je významná pouze autokorelace. Vztahy pro její výpočet se liší v závislosti na tom, zda je prováděna autokorelace výkonového signálu nebo energetického signálu. Autokorelační funkci  $R_{xx}(\tau)$  energetického signálu  $x(t)$  lze definovat rovnicí (21):

$$R_{xx}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)x(t+\tau) dt \quad (21)$$

resp. pro digitalizované signály, které představují posloupnosti vzorků, je autokorelační funkce  $R_{xx}(\tau)$  výkonového signálu  $x(t)$  dána vztahem (22). Zde lze posunutí  $\tau$  přepsat jako celistvý násobek  $k$  vzorkovací periody  $T_{vz}$ .

$$R_{xx}(kT_{vz}) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(nT_{vz})x(nT_{vz} + kT_{vz}) \quad (22)$$

kde

$N$  (-)...konečný počet vzorků (délka číselných dat),

$n$  (-)... $n$ -tý vzorek číselných dat,  $n = 1 \dots N$ ,

$k$  (-)...posun,  $k = -N+1 \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots, N-1$  (pokud není specifikováno jinak),

$T_{vz}$  (s)...vzorkovací perioda (vzdálenost mezi vzorky).

Autokorelační funkce je sudá funkce s maximem v  $\tau = 0$ , pro kterou platí, že  $R_{xx}(\tau) = R_{xx}(-\tau)$ .

Autokorelaci lze využít jako metodu pro detekci periodicity v signálu, který je skryt v šumu. Jestliže je signál periodický, je také funkce zpoždění  $\tau$  periodická. Takováto funkce pak bude mít zřejmá lokální maxima nejen v  $\tau = 0$ , ale také v násobcích periody náhodného signálu  $\tau = k \cdot T$ , kde  $k$  je přirozené číslo a  $T$  je perioda signálu.

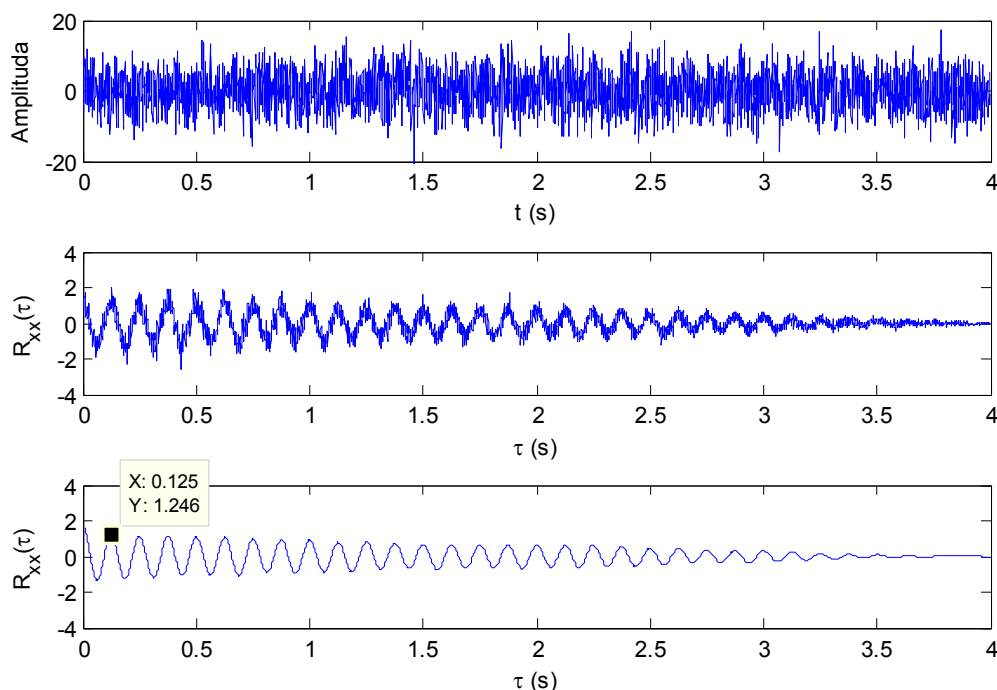
V Matlabu je pro korelační analýzu vyhrazena funkce s názvem `xcorr`. Jestliže je zadán pouze jeden signál např.  $x(t)$  jako vstupní argument, pak je provedena autokorelace posloupnosti dat a je získán její odhad. Maximální povolená délka vstupního vektoru je  $2^{20}$ . Algoritmus pro autokorelaci je  $R_{xx} = \text{xcorr}(x)$ . V některých případech je výhodnější získat i odpovídající indexy posunu  $k$ , na kterých byla  $R_{xx}$  odhadnuta. Je to například při grafickém vyjádření autokorelační funkce, kdy je získán tzv. korelogram. Pak je použita syntaxe  $[R_{xx}, k] = \text{xcorr}(x)$ . V uvedených případech se jedná o odhad autokorelační funkce energetických signálů. Dále je také možné využít některou z metod normalizace autokorelace 'option', jako 'biased', 'unbiased', 'coeff'. Metoda 'coeff' je využívána pro výpočet normované autokorelační funkce s hodnotou 1 v posunu  $k = 0$ . Metody 'biased' a 'unbiased' jsou určeny pro autokorelaci výkonových signálů. V případě argumentu 'biased' je proveden vychýlený odhad autokorelační funkce dle rovnice (22) a příkaz pro jeho provedení je  $[R_{xx}, k] = \text{xcorr}(x, 'biased')$ .

Pokud je zvolen jako vstupní argument 'unbiased' je realizován nevychýlený (nestranný) odhad autokorelační funkce, dle rovnice (23):

$$R_{xx}(kT_{vz}) = \frac{1}{N-k} \sum_{n=1}^{N-k} x(nT_{vz})x(nT_{vz} + kT_{vz}) \quad (23)$$

U vychýleného odhadu autokorelační funkce se s vyšší hodnotou posunu  $k$  (testovaných period signálu) snižuje počet provedených součinů, což ovlivňuje podobu autokorelační funkce, která získá klesající charakter. Naproti tomu u nevychýleného odhadu je zohledněn počet reálně provedených součinů a pro větší hodnoty  $k$  je zde snaha o vyrovnání trendu autokorelační funkce. Nicméně, v praxi je pro svou větší numerickou stabilitu využíván výpočet vychýleného odhadu autokorelační funkce.

Ačkoliv je autokorelace sudá funkce, lze pro interpretaci výsledků využít pouze její jednostrannou podobu. Na obr. 19 je zobrazen příklad jednostranného vychýleného odhadu autokorelační funkce časového signálu s frekvencí 8 Hz, který je skryt v šumu. Šum ovlivňuje také vzhled autokorelační funkce, což ztěžuje interpretaci výsledků. Proto je výhodné provést její filtraci pomocí filtru typu dolní propust. Na průběhu autokorelační funkce jsou zřetelná maxima. Vzdálenost mezi nimi charakterizuje periodu signálu  $T = 0,125$  s, kterou by nebylo možné z původního časového signálu určit.



**Obr. 19** *Nahoře:* 8 Hz signál ukrytý v šumu; *uprostřed:* autokorelační funkce časového signálu; *dole:* autokorelační funkce časového signálu (filtrovaná) s kurzorem v lokálním maximu 0,125 s.

Autokorelační funkce periodických signálů je stejně nepřehledná jako originální časový průběh signálu, protože obsahuje více harmonických funkcí časového posunutí o různé periody. V tomto případě je vhodnější detekovat jednotlivé periody, resp. frekvenční složky ze spektra signálu.

[8], [65], [66]

## 6 Analýza audiosignálů prostřednictvím programu Matlab

Analýza a její prostředky jsou určeny pro posouzení, pochopení a následnou interpretaci obsahu zaznamenaných zvukových signálů. Někdy se jedná jen o vizualizační metody, jindy je nutné použít pro zpracování audio souborů dalších, většinou složitějších postupů. [22]

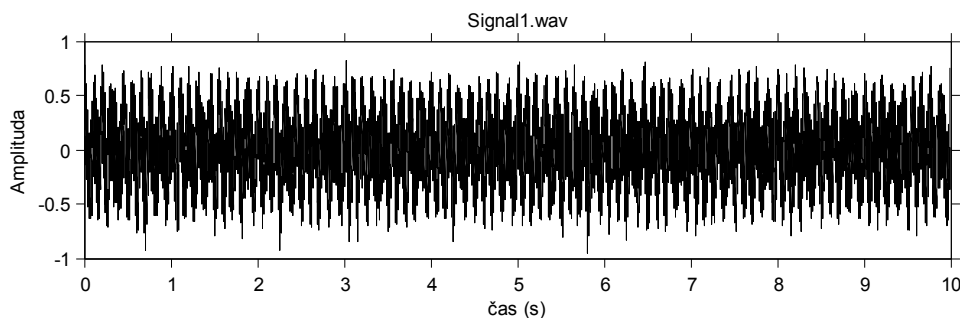
Pro analýzu zvukových signálů prováděnou v rámci této diplomové práce jsou použity záznamy, které jsou výsledkem reálných měření. Tato měření byla provedena „*Národní referenční laboratoří pro komunální hluk*“ v Ústí nad Orlicí při Zdravotním ústavu se sídlem v Ostravě, která také nahrávky pro rozbor poskytla. Audiozáznamy byly pořízeny prostřednictvím zvukoměru (typ 2270, Brüel & Kjær), který umožňuje uložení průběhu měření do formátu .wav. Na tomto konkrétním typu zvukoměru je možné nastavit 4 úrovně kvality zvukového záznamu (*Low, Fair, Medium, High*), které se liší použitou vzorkovací frekvencí  $f_{vz}$ , maximální zaznamenanou frekvencí  $f_{max}$  a přenosovou rychlostí dat  $PR$ . Většina nahrávek je realizována v režimu *Medium* ( $f_{vz}$ : 24 kHz,  $f_{max}$ : 10 kHz,  $PR$ : 48 kB/s) nebo *High* ( $f_{vz}$ : 48 kHz,  $f_{max}$ : 20 kHz,  $PR$ : 96 kB/s).

Pro zpracování charakteristik zvukových signálů je k dispozici pět záznamů. Tři záznamy v kvalitě *Medium* a dva v kvalitě *High*. V tab. 3 jsou uvedeny základní údaje k nahrávkám. Časové průběhy reálných signálů jsou vykresleny a umístěny do přílohy III.

**Tab. 3** Charakteristika audionahrávek z reálných měření.

Název souboru	$f_{vz}$ (Hz)	$f_{max}$ (Hz)	Délka záznamu (s)
CisticiVuz.wav	24 000	10 000	152
Drums.wav	48 000	20 000	106
HudbaTechno.wav	48 000	20 000	174
HudbaVzdalena.wav	24 000	10 000	243
TibetMisa.wav	24 000	10 000	30

Pro testování funkcí programu je v Matlabu vygenerován signál a uložen jako Wave soubor s názvem *Signal1.wav* (obr. 20). Jedná se o harmonický signál, který je zadán následujícím předpisem:  $x(t) = 0,08 \sin(2\pi 7t) + 0,12 \sin(2\pi 11t) + 0,2 \cos(2\pi 9t) + 0,04 \sin(2\pi 13,5t)$  a doplněn o náhodný šum. Výsledný signál má v tomto případě nulovou střední hodnotu a směrodatnou odchylkou 0,15.



**Obr. 20** Vytvořený testovací signál s názvem *Signal1.wav*.

## 6.1 Návrh grafického prostředí pro zpracování audiozáznamů

Pro vytvoření grafického uživatelského rozhraní (angl. *Graphical User Interface*, zkr. GUI) je využit program Matlab, konkrétně 64bitová verze 7.10.0.499 (R2010a) pro operační systém Windows. Uživatelské prostředí je určeno pro analýzu zvukových signálů, které jsou uloženy v audio formátu WAVE.

Program je graficky rozdělen na dvě části. V horní části jsou zobrazeny obecné informace o načteném souboru a je zde také panel sloužící pro zobrazení a přehrávání zvukové stopy zvoleného kanálu, příp. pouze vybraného úseku záznamu. Také je zde umístěn panel nástrojů, tzv. toolbar, pro usnadnění manipulace s daty. První ikona zleva je vyhrazena pro načtení požadovaného souboru v programu. Spodní část GUI je určena pro rozbor zvukové nahrávky s využitím některé z dostupných metod. Mezi těmito bloky jsou pak umístěna tlačítka pro možnou filtraci signálu a detekci obálky signálu.

Vzhled navrženého uživatelského prostředí, spolu s detailním návodem na použití, jsou uvedeny v přílohách IV a V.

### 6.1.1 Naprogramované metody zpracování zvukových signálů

Pro větší přehlednost jsou naprogramované metody rozděleny do tří částí, které korespondují s grafickým rozvržením vytvořeného GUI. Konkrétně se bude jednat o dva bloky a jednu sadu tlačítek.

#### Blok pro vizualizaci a přehrávání zvukových záznamů

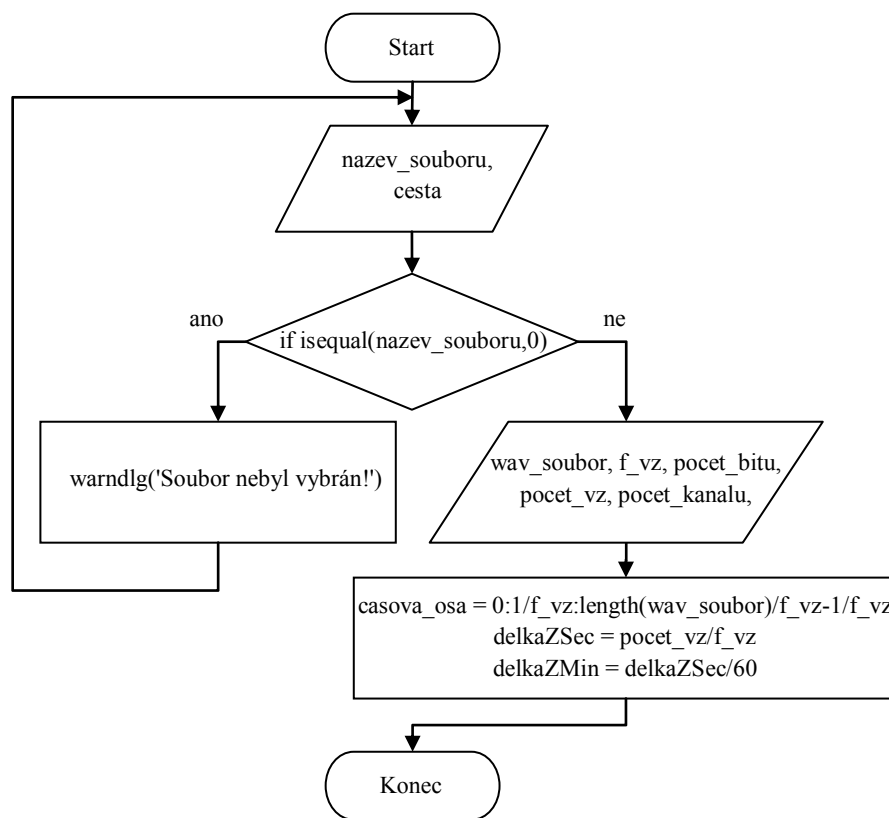
Tento blok je určen pro vykreslení a přehrávání celého zvukového záznamu nebo jeho vybrané části. Po načtení záznamu, resp. číselných dat do paměti Matlabu, je signál vykreslen do dvou příslušných grafů v horní části programu. Ve větším (hlavním) grafu je zobrazen buď celý signál, nebo aktuálně vybraný časový úsek. V menším (vedlejší) grafu je zobrazen celý průběh záznamu. Pokud je uživatelem vybrána a následně v hlavním grafu zobrazena část signálu, je tato konkrétní část vyznačena pomocí dvou vertikálních linií i ve vedleším grafu. Je to z důvodu, aby měl uživatel neustálý přehled o poloze zvoleného úseku v celém časovém záznamu.

V případě, že je záznam stereofonní, je možné zobrazení a přehrávání obou kanálů najednou. Pokud je vybrána tato možnost, je v hlavním grafu zobrazen 1. kanál záznamu a menší graf je nahrazen jiným větším grafem, ve kterém je zobrazen 2. kanál záznamu. Jelikož jsou všechny použité nahrávky monofonní, je automaticky umožněno zobrazení pouze jednoho kanálu.

Výběr požadované části signálu lze provést dvěma způsoby, a to zadáním hodnot do příslušných kolonek nebo přímo prostřednictvím počítačové myši. V případě potřeby je tento výběr možné přehrát. Pro přehrávání celého signálu slouží jiná tlačítka, která navíc umožňují také přerušení přehrávání, tj. pauzu a dále jeho opětovné pokračování nebo úplné zastavení.

Vykreslit a přehrávat lze nejen původní zvukové záznamy, tj. v podobě v jaké byly načteny do paměti programu, ale také záznamy upravené filtrací. Načtení signálu do paměti je základním předpokladem pro provedení jeho vizualizace, přehrávání či analýzy. Algoritmus načtení dat signálu a potřebných proměnných je znázorněn pomocí vývojových diagramů na obr. 21.





**Obr. 21** Algoritmus načtení zvukového záznamu.

Stručný algoritmus zobrazení a přehrávání celého monofonního zvukového záznamu je následující:

- 1) Načti proměnné *wav\_soubor*, *f\_vz*, *Filtr\_SIG*,
- 2) Je provedena filtrace signálu?  
**ANO** – *FiltracE*=1; Načti *Filtr\_SIG*, *f\_vz*, *casova\_osa*;  
 Vykresli celý záznam; syntaxe: `plot(casova_osa, Filtr_SIG);`  
 (Přehraj celý záznam; syntaxe: `play(audioplayer(Filtr_SIG, f_vz));`)  
**NE** – *FiltracE*=0; Načti *wav\_soubor*, *f\_vz*, *casova\_osa*;  
 Vykresli celý záznam; syntaxe: `plot(casova_osa, Filtr_SIG);`  
 (Přehraj celý záznam; syntaxe: `play(audioplayer(wav_soubor(:,1), f_vz));`)
- 3) Konec

Vykreslení záznamu je provedeno vždy, ale přehrávání je uskutečněno pouze při vyvolání příslušné funkce uživatelem. Proto je funkce uvedena v závorkách. Vstupní proměnné *wav\_soubor* a *f\_vz* jsou získány již při načtení souboru. Proměnná *Filtr\_SIG* je naplněna hodnotami až po provedení filtrace zvukového signálu, v opačném případě se jedná o prázdný vektor.

Algoritmus pro zobrazení a přehrávání části záznamu je obdobný tomu pro vizualizaci celého signálu. Rozdíl je zde v definování časových mezí, resp. počátečního a koncového vzorku výběru záznamu.

### **Sada tlačítek pro filtraci zvukových záznamů a detekci obálky**

Jedná se o tři tlačítka, která jsou určena pro filtraci zvukového záznamu a o dvě tlačítka, která jsou naprogramována pro detekci obálky signálu. Konkrétně je u filtrace jedno tlačítko vyhrazeno pro nastavení parametrů filtrace, druhé pro vlastní provedení filtrace na základě zadaných specifikací a třetí pro případ, že je potřeba obnovit původní signál před filtrací.

Filtrace je realizována filtrem typu pásmová propust s aproximací frekvenční odezvy typu Butterworth, která se v propustném pásmu vyznačuje plochým průběhem bez zvlnění. Butterworthův filtr je jednou z nejpoužívanějších aproximačních funkcí vůbec.

Podrobnější informace o filtraci a zadávaných parametrech u filtru typu pásmová propust jsou uvedeny v kapitole 5.2.1.

Pro metodu detekci obálky, která je nazývána také amplitudová demodulace, je určeno jedno tlačítko, po jehož stisknutí je obálka vykreslena do časového průběhu signálu v horním velkém grafu. Druhé tlačítko označené křížkem po stisknutí odstraní obálku z původního signálu.

Obecně je jako obálka signálu označována hranice, v níž je obsažen daný signál v časové doméně. Je to pomyslná křivka, složená z horní a dolní části, které jsou zobrazeny zrcadlově. V praxi je obvykle využívána pouze jedna z této části, většinou horní křivka. Ta je zobrazena i v tomto případě. I když je obálka signálu pouze imaginární, lze ji vytvořit z původního signálu např. pomocí obvodu nazývaného detektor obálky. Tento obvod z původního amplitudově modulovaného signálu extrahuje modulační signál. Každý signál má obálku, avšak např. u širokopásmových signálů je obtížnější její vizualizace.

V praxi spočívá analýza obálky především ve výpočtu jejího frekvenčního spektra algoritmem *FFT*. Tato analýza je využívána zejména v diagnostice poruch nebo místních poruch strojních zařízení, kde mají tyto závady amplitudově modulovaný efekt na charakteristické frekvence daného zařízení. Těmito strojními zařízeními jsou např. převodovky, turbíny a indukční motory. Místními poruchami, které lze na základě analýzy obálky odhalit, jsou pak např. nejruznější závady na valivých ložiscích. [75]

Navržená funkce pro detekci obálky signálu v tomto programu je určena pouze pro její zobrazení bez možnosti dalšího zpracování. Algoritmus detekce je založen na filtraci vyšších frekvencí pomocí dolnoproputného filtru, kde lze mezní frekvenci  $f_c$  volit dle potřeby, a to zápisem číselné hodnoty do příslušné kolonky. Před samotnou filtrací je ještě provedeno umocnění signálu na druhou a jeho zesílení faktorem 2, které zajistí stejnou energii upraveného signálu, jakou měl signál původní. Po filtraci je nutné provést dodatečné odmocnění signálu, čímž je odstraněno zkreslení způsobené jeho předešlým umocněním.

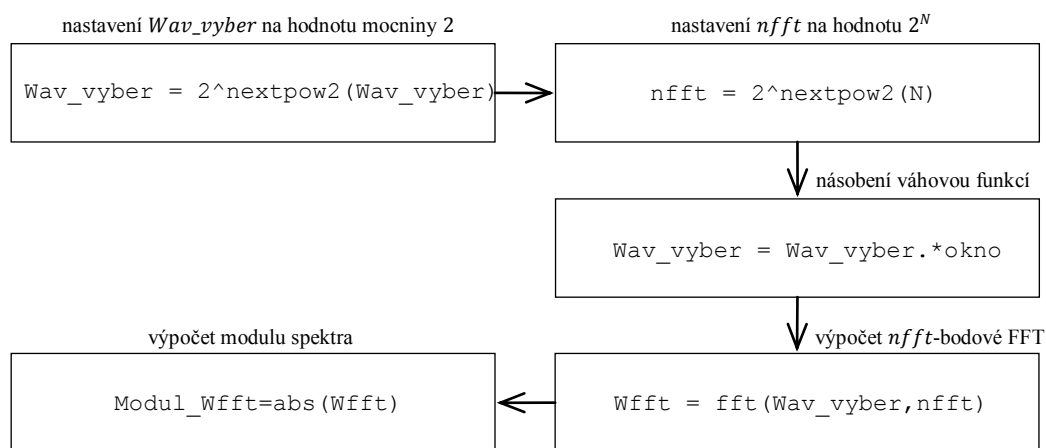
### **Blok pro analýzu zvukových záznamů**

Tato část GUI je určena pro frekvenční analýzu, časově-frekvenční analýzu a pro detekci možného výskytu periodicity v signálu. Pro analýzu je možné vybrat celý signál nebo jeho konkrétní část. V obou případech však musí dojít k potvrzení zvoleného úseku. Výběr dat je uživatelem proveden již v bloku pro vizualizaci a přehrávání zvukového záznamu a daný úsek či celý záznam je vykreslen v příslušném grafu.

Výsledné charakteristiky jsou zobrazeny ve dvou grafech. Stejně jako v bloku pro vizualizaci dat lze u horního většího grafu nastavit požadovanou oblast zobrazení pro detailnější pohled. V dolním menším grafu pak výsledná charakteristika zůstává trvale vykreslena v celém možném rozsahu.

Pro **frekvenční analýzu** jsou naprogramovány čtyři metody. Tři využívají pro výpočet spektra algoritmus rychlé Fourierovy transformace. Poslední čtvrtá metoda je 1/3 oktávová analýza.

První metoda je určena pro výpočet jednostranného amplitudového spektra s lineárními hodnotami amplitudy na vertikální ose. Vstupními parametry *FFT* jsou zde vektor dat *Wav\_vyber* a číslo *nfft* určující délku, resp. počet vzorků, do které bude původní vektor upraven. Výběr je možné násobit některou z nadefinovaných váhových funkcí, tzv. oken, přičemž výchozím oknem je pravoúhlé okno. Na základě nastavených údajů je vypočtena *nfft*-bodová diskretní Fourierova transformace algoritmem *FFT*. Pro *nfft* členů posloupnosti vzorků je tedy získáno *nfft* obecně komplexních koeficientů spektra. Pro vykreslení amplitudové charakteristiky je potřeba z těchto komplexních čísel vypočítat moduly. K tomu slouží v Matlabu funkce *abs*. Počet *nfft* bodů je v GUI nastavován uživatelem a pro zvýšení efektivity výpočtu je zadané číslo automaticky upraveno na nejbližší větší hodnotu mocniny dvou. Stejným způsobem je upravena i délka původního signálu či výběru. Postup výpočtu je prostřednictvím blokového schématu znázorněn na obr. 22.



**Obr. 22** Blokové schéma znázorňující výpočet amplitudového spektra.

Druhá metoda je naprogramována pro výpočet jednostranné výkonové spektrální hustoty s lineárními hodnotami na vertikální ose. *PSD* je získána z výkonového spektra podělením jeho složek frekvenčním krokem spektra  $\Delta f$ . [26], [14]

Třetí metoda je naprogramována pro výpočet jednostranné výkonové spektrální hustoty s hodnotami decibelů na vertikální ose. Výpočet je proveden stejně jako u předchozí metody, s tím rozdílem, že jsou výsledné hodnoty *PSD* dále upraveny pomocí příkazu  $10 \cdot \log_{10}(PSD)$  do hodnot decibelů.

Poslední metodou spektrální analýzy je třetinoctávová analýza, která je určena pro zobrazení zvukového signálu v 1/3 oktávových frekvenčních pásmech. Třetinoctávové filtry jsou řazeny do skupiny filtrů s konstantní relativní šířkou pásma (angl. Constant Percentage Bandwidth, zkr. CPB), kde je šíře pásma propustnosti *B* procentuálně konstantní vzhledem ke střední frekvenci

$f_m$  v daném pásmu, tj. poměr  $B/f_m$  je konstantní a jeho hodnota je 23 %. To znamená, že u nízkých frekvencí je absolutní šířka pásma extrémně úzká, zatímco u vysokých frekvencí je poměrně široká. Na logaritmickém frekvenčním rozsahu lze analýzou v 1/3 oktavových pásmech získat konstantní relativní šířku pásma. [3], [21], [26]

Třetinooktavové filtry, nazývané také zlomkooktavové, jsou filtry typu pásmová propust s amplitudovou frekvenční charakteristikou stanovenou normami ANSI/ASA S1.11-2014 (část 1), IEC 61260-1:2014, ČSN EN 61260-1:2014 aj. V této verzi Matlabu z roku 2010, ve vyšších verzích i v nejnovější verzi z roku 2015 je implementován třetinooktavový filtr dle technických požadavků uvedených ve starší verzi amerického standardu ANSI S1.11-2004. V něm jsou specifikovány charakteristiky 3 tříd filtrů, které jsou označeny jako třída 0, 1 a 2 s tolerančními mezemi zvlnění v propustném pásmu  $\pm 0,15$  dB,  $\pm 0,3$  dB a  $\pm 0,5$  dB. Útlum v nepropustném pásmu je u jednotlivých tříd filtrů odlišný a pohybuje se od 60 do 75 dB. Starší harmonizovaná norma ČSN EN 61260 z roku 1995, která je obdobou uvedeného amerického standardu, je platná do 21. 3. 2017 souběžně s nově vydanou normou z roku 2014. V té je nově např. zrušena třída 0.

Pro vytvoření banky 1/3 oktavových filtrů je využit příkaz `fdesign.octave`, kde je nutné specifikovat vstupní parametry jako počet pásem na oktavu, třídu filtru, řád filtru, platné střední frekvence pro jednotlivá třetinooktavová pásma a vzorkovací frekvenci signálu. Jelikož se jedná o třetinooktavový filtr, jsou nastavena 3 pásma na oktavu. Třidu filtru je zde možné přepínat mezi třídou 1 a třídou 2. Banka filtrů je navržena 8. řádu se středními frekvencemi dílčích filtrů, které odpovídají standardizovanému rozsahu 25 Hz až 20 kHz. Vzorkovací frekvence je doplněna automaticky dle aktuální vzorkovací frekvence analyzovaného signálu.

Aplikací banky třetinooktavových filtrů na časový záznam signálu jsou získána odpovídající třetinooktavová pásma. Každé z těchto pásem je určeno svou šířkou  $B$  a odpovídající efektivní hodnotou akustického tlaku, která je upravena do hodnot v decibelech. [35] Efektivní hodnota (angl. Root Mean Square, zkr. RMS) je vypočtena následovně.

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n^2} \quad (24)$$

kde

$x_{RMS}$  (Pa) ...efektivní hodnota,

$N$  (-) ...počet vzorků výběru,

$n$  (-) ...celé číslo od 1 až  $N$ ,

$x_n$  (Pa) ... $n$ -tá hodnota vzorku.

Dle starších norem lze využít pro návrhy filtrů systém o základu 10 nebo 2. V aktuálních normách je stanoven návrh filtrů pouze o základu 10, který je využit i u následujících příkladů výpočtů.

Pro výpočet přesné střední frekvence  $f_m$  dle rovnice (25) je zavedena referenční frekvence  $f_r$ .

$$f_m = \left( (10^{3/10})^{x/3} \right) f_r \quad (25)$$

kde

$f_m$  (Hz) ...přesná střední frekvence,

$f_r$  (Hz) ...referenční frekvence 1000 Hz (index 0),

$x$  (-)...celé číslo záporné, kladné nebo nulové (v závislosti na indexu daného pásma).

Například přesná střední frekvence je pro 1/3 oktávové pásmo o indexu -1, tzn. pro pásmo předcházející pásmu se střední hodnotou 1000 Hz:

$$f_m = \left( (10^{3/10})^{-1/3} \right) 1000 = 794,33 \text{ Hz}$$

Této přesné střední frekvenci pak odpovídá uváděná nominální hodnota střední frekvence 800 Hz.

Na základě znalosti přesné střední frekvence lze získat dle rovnic (26),(27) také mezní frekvence daného pásma, tedy dolní mezní frekvenci  $f_1$  a horní mezní frekvenci  $f_2$ :

$$f_1 = \left( (10^{3/10})^{-1/6} \right) f_m \quad (26)$$

$$f_2 = \left( (10^{3/10})^{1/6} \right) f_m \quad (27)$$

Šířka pásma  $B$  je tak dána rozdílem frekvencí  $f_2$  a  $f_1$ , kde příslušná střední frekvence  $f_m$  představuje geometrický průměr těchto dvou mezí, tj.  $f_m = \sqrt{f_1 f_2}$ . Tyto uvedené výpočty jsou zabudovány do funkce pro návrh třetinooktávového filtru a realizovány interně.

Třetinooktávová analýza nedává informaci o hladině diskretních složek spektra. Proto se využívá především k určení celkové hlučnosti, kde není vyžadována přesná znalost spektra. [3], [5], [6]

**Časově frekvenční analýza** je určena pro sledování frekvenčních změn v čase, resp. ve velmi krátkých časových úsecích. Proto je vhodná zejména pro rozbor velmi dlouhých signálů nebo nestacionárních signálů, které jsou charakteristické v čase proměnnými parametry. Jedním ze základních časově frekvenčních postupů je krátkodobá Fourierova transformace (angl. *Short Time Fourier Transform*, zkr. *STFT*). *STFT* je lineární transformace, která je modifikací Fourierovy transformace. Základní myšlenkou této metody je rozdělení analyzovaného zvukového signálu na krátké úseky, tzv. segmenty, u nichž je možno předpokládat dostatečnou stacionaritu. Toto rozdělení je realizováno pomocí zvolené okénkové funkce. Tato funkce je postupně posouvána a násobena s odpovídajícím časovým úsekem signálu. V každém získaném segmentu je následně provedena Fourierova transformace, resp. *FFT*.

*STFT* podává přehled o časovém výskytu frekvenčních složek s konstantním rozlišením. To je zajištěno stále stejnou délkou časového okna. Nevýhodou *STFT* je, že není možné dosáhnout zároveň vysokého rozlišení v čase i frekvenci. Pro účely analýzy zvukových signálů o nízkých frekvencích bylo zvoleno větší frekvenční rozlišení, které bylo dosaženo volbou delšího časového okna. Další možností, jak zvýšit frekvenční rozlišení je snížení vzorkovací frekvence signálu.

Výsledná dílčí spektra lze zobrazit např. ve formě spektrogramu, který představuje naprogramovanou metodu pro časově frekvenční analýzu. Spektrogram je využíván pro 3D nebo 2D grafické vyjádření spekter jednotlivých segmentů. V případě 3D spektrogramu jsou frekvenční a časová osa nezávisle proměnné veličiny. Závislou veličinou je nejčastěji amplituda či výkon na vertikální ose. Pokud je spektrogram zobrazen jako 2D graf, jedná se o pohled shora na původní 3D spektrogram. Na dvou ortogonálně zobrazených osách je frekvence a čas, velikost amplitudy je vyjádřena pomocí barevné škály.

V programu Matlab je k dispozici funkce `spectrogram`, kterou je možné využít pro zobrazení spektrogramu zvukového záznamu. V rámci této funkce lze získat výsledná spektra vypočtená algoritmem *STFT*. Pro výpočet spektrogramu je zvolena syntaxe:

```
[S,F,T,P] = spectrogram(x,window,noverlap,nfft,fvz);
```

Vstupními parametry jsou zde vektor dat  $x$ , Hammingova okenní funkce (`window`) délky `nfft`, počet vzorků překrytí segmentů (`noverlap`), délka vektoru *FFT* (`nfft`) a vzorkovací frekvence signálu `fvz`. Výstupem je vektor hodnot po provedení *STFT* ( $S$ ), vektor s hodnotami frekvencí ( $F$ ), vektor s časy, ve kterých byl spektrogram vypočítán ( $T$ ) a hodnoty spektrální výkonové hustoty pro každý segment ( $P$ ).

Zvukové záznamy, které mají být analyzovány, jsou pořízeny zvukoměrem, který je schopen měřit signály od frekvence přibližně 6,3 Hz. Proto by časové okno mělo být voleno takové délky, aby v něm mohly být zachyceny alespoň 2 periody signálu o zmiňované frekvenci. Na základě vztahu, který definuje periodu jako převrácenou hodnotu frekvence, by měla být délka okna cca 320 ms nebo větší. Konkrétně je zvolena délka okna (časové rozlišení) 341,3 ms, zaokrouhleně 341 s, jejímž přepočtem dle vztahu (28) je získána odpovídající délka okna ve vzorcích.

$$okno_{vz} = f_{vz} \cdot okno_{sec} \quad (28)$$

kde

$okno_{vz}$  (-) ...délka okenní funkce ve vzorcích,

$okno_{sec}$  (s) ... délka okenní funkce v sekundách,

$f_{vz}$  (Hz) ...vzorkovací frekvence signálu.

Délka okna byla zvolena záměrně o této hodnotě, aby byla zachována podmínka  $2^N$  pro délku `nfft`. Pro vzorkovací frekvence analyzovaných signálů, které jsou 24 000 Hz a 48 000 Hz, je podle vztahu (28) délka okna ve vzorcích 8192 ( $2^{13}$ ) a 16384 ( $2^{14}$ ). Těmto hodnotám pak odpovídá frekvenční rozlišení 2,93 Hz. Dané hodnoty časového a frekvenčního rozlišení jsou platné pouze pro uvedené vzorkovací frekvence. V případě, že budou navrženou metodou analyzovány zvukové signály s jinou vzorkovací frekvencí, budou hodnoty obou rozlišení jiné. Pro zvukový záznam se vzorkovací frekvencí 24 000 Hz je v Matlabu použit následující příkaz výpočtu. Nulová hodnota značí, že je realizována segmentace signálu bez vzájemného překrytí.

```
[StftV,FrekV,TimeV,PsdV] = spectrogram(Wav_vyber,8192,0,8192,24000);
```

Navržené GUI umožňuje zobrazení spektrogramu jak v 2D, tak i v 3D verzi. U 2D spektrogramu je na horizontální ose čas a na vertikální ose frekvence. Amplituda, resp. výkonová spektrální hustota v decibelech, je vyjádřena barevně. Pro vykreslení spektrogramu byla využita funkce `surf`, která vykresluje 3D graf. Pro změnu na 2D graf byl využit příkaz `view`, který upřesňuje zorný úhel pohledu. Pro vykreslení 3D spektrogramu je aplikována funkce s názvem `waterfall`. Ta umožňuje zobrazení časově řazených krátkodobých spekter, u nichž je možné sledovat vývoj amplitud frekvencí, v tomto případě hodnot výkonové spektrální hodnoty (*PSD*), v čase. Jelikož je vykreslení 3D spektrogramu touto metodou výpočtově velmi náročné, je naprogramováno zobrazení krátkodobých spekter v jednotlivých segmentech pouze do frekvence 200 Hz.

V GUI jsou dále implementovány funkce pro zjištění případné **periodicity v signálu**. Jedná se o autokorelační funkci a cepstrální analýzu. Podrobnější popis těchto metod je již uveden v kapitolách 5.2.3 a 5.2.4.

## 6.2 Rozbor audiozáznamů a vyhodnocení zjištěných výsledků

Výsledkem většiny realizovaných zvukových měření jsou data vyjádřená v hodnotách akustického tlaku s jednotkou Pascal. S využitím získaných hodnot jsou poté prováděny analýzy zvukových signálů za účelem získání požadovaných veličin. Z výsledků zvukových měření akustického tlaku mohou být následně odvozeny hladiny v jednotkách dB, na jejichž základě se provádí hodnocení daného zvuku. Rozsah naměřených hodnot akustického tlaku je poměrně široký a pohybuje se v rozmezí několika řádů. Vytvořené uživatelské prostředí je určeno pro analýzu zvukových signálů, které jsou uloženy v audio formátu Wave, kde se hodnoty pohybují v normovaném rozsahu od -1 do 1 a nekorespondují tedy s absolutními hodnotami naměřeného akustického tlaku.

Na základě této skutečnosti je nutné uvést, že bez znalosti skutečných hodnot akustického tlaku původního signálu, nelze provést kalibraci dat a z daného zvukového záznamu není možné získat odpovídající hodnoty hladin akustického tlaku v dB, které jsou potřebné k výpočtům a vyhodnocení mnoha parametrů. Proto mohly být do GUI implementovány pouze metody, jejichž výpočty nebo hodnocení nejsou závislé na hodnotách akustického tlaku zvukového vlnění.

V následující části práce je popsána provedená analýza zvukových záznamů. Popis je zaměřen především na výsledky rozboru reálných záznamů z měření. Výsledky analýzy testovacího signálu jsou uvedeny pro ukázkou funkčnosti, případně principu některých naprogramovaných metod.

U spektrální analýzy realizované pomocí *FFT* je nutné vhodně zvolit frekvenční rozlišení, resp. frekvenční krok  $\Delta f$  počítaného spektra. Frekvenční krok je ukazatelem odstupu jednotlivých spektrálních čar a určuje jejich hustotu. Je dán vztahem (29):

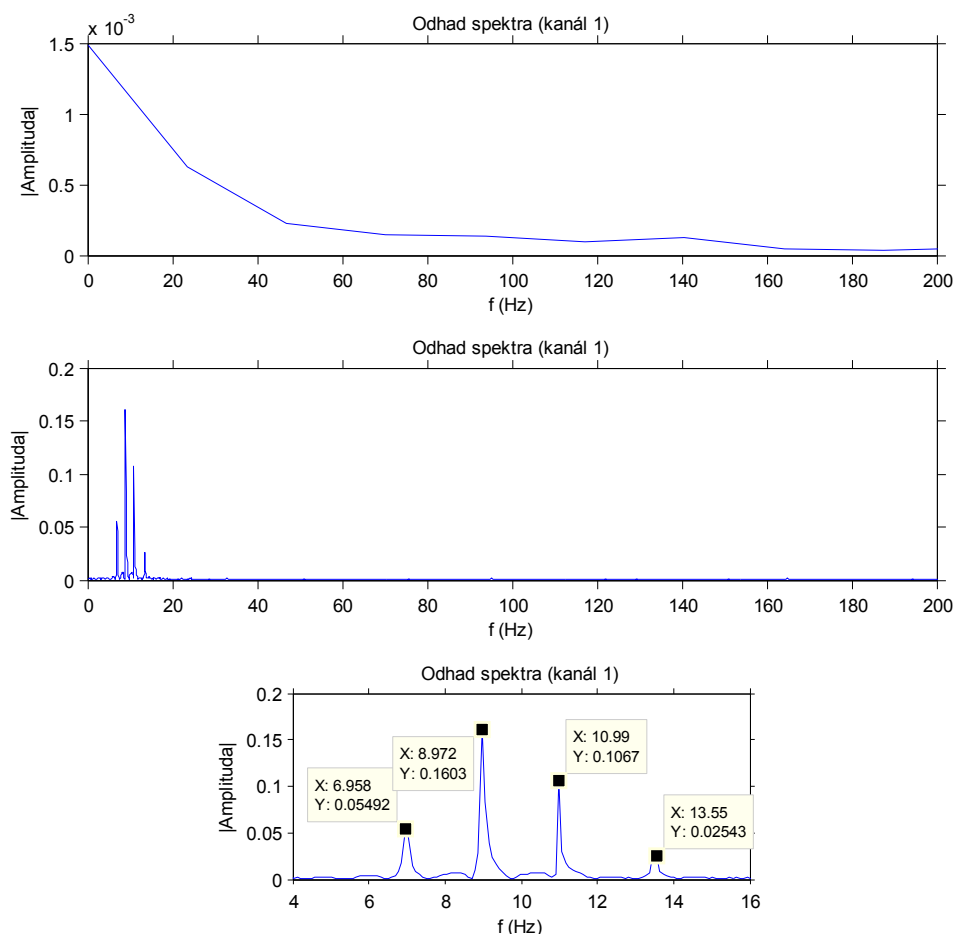
$$\Delta f = \frac{f_{vz}}{k} \quad (29)$$

kde

$f_{vz}$  (Hz) ... vzorkovací frekvence signálu,

$k$  (-) ... zvolený počet vzorků signálu.

Počet vzorků  $k$ , který je jedním ze vstupních parametrů *FFT*, je v *GUI* zadáván uživatelem do příslušné kolonky. Výchozí nastavenou hodnotou  $k$  (v programu nazvanou *nfft*) je 1024 bodů (vzorků). Frekvenční rozlišení spektra lze zvýšit zmenšením frekvenčního kroku  $\Delta f$ . Jak vyplývá ze vztahu (29) lze to provést například volbou většího počtu vzorků. Na spektrech testovacího signálu, který je tvořen nízkými frekvencemi s navzájem málo odstupňovanými hodnotami, je možné dobře pozorovat vliv zvoleného počtu vzorků (obr. 23). Při volbě 1024 bodové *FFT* je frekvenční krok 23,44 Hz. S tímto frekvenčním rozlišením není možné rozeznat ve spektru jednotlivé frekvenční složky testovacího signálu, které jsou 7, 9, 11 a 13,5 Hz. Při volbě 262 144 vzorků se frekvenční krok  $\Delta f$  zmenší na 0,09 Hz, čímž se podstatně zvýší frekvenční rozlišení a přesnost odhadu spektra. Jelikož jsou všechny analyzované signály dostatečně dlouhé, je možné takový způsob zvýšení frekvenčního rozlišení využít. V opačném případě je vhodnější zvýšení frekvenčního rozlišení zmenšením vzorkovací frekvence signálu.



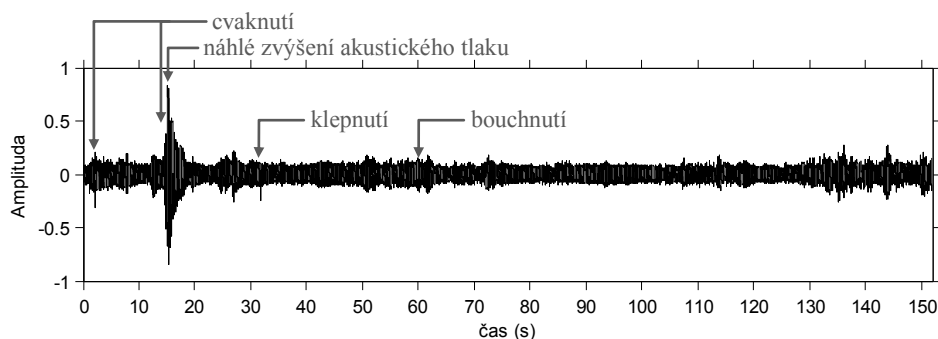
**Obr. 23** Odhad amplitudových spekter tetovacího signálu. Nahoře:  $k = 1024$ , uprostřed:  $k = 262\,144$ , dole:  $k = 262\,144$  (detail).

Na obr. 23 je znázorněno amplitudové frekvenční spektrum s vyjádřením modulu na vertikální ose. V podstatě zde však může být daná veličina popsána např. v efektivních hodnotách nebo v podobě často využívaných hladin v dB třeba jako výkonová spektrální hustota, která je také jednou z naprogramovaných metod. Jelikož je však odhad spektra uskutečněn pro zvukový záznam v normalizovaném rozsahu a nikoliv pro zvukový signál v hodnotách reprezentujících akustický tlak, není zde příliš důležitá volba jednotky na této ose.

Všechny poskytnuté reálné záznamy obsahují šum, který má velmi podobný průběh a ve spektru je reprezentován výraznými frekvenčními složkami ve frekvenční oblasti do 6 Hz, kterou již samotný zvukoměr není schopen měřit. Pravděpodobně se jedná o vlastní šum generovaný obvody měřicího zařízení. Z toho důvodu jsou všechny signály filtrovány od těchto nežádoucích frekvencí a až poté dále analyzovány. Nastavené hodnoty parametrů základní filtrace a také pozdější filtrace jsou uvedeny v příloze VI.

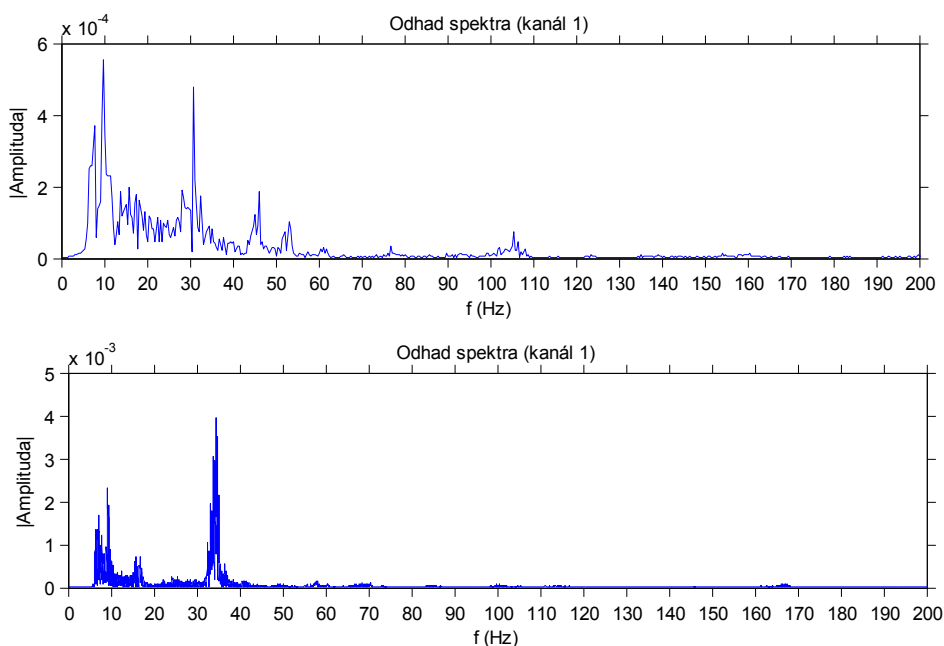


Na první analyzované audionahrávce s názvem *CisticiVuz.wav* je zachycen zvuk čistícího vozu při průjezdu a vykonávání pracovní činnosti, tj. při čištění dopravních komunikací poblíž místa měření. Tím byla místnost v bytě ve 3. patře na sídlišti. Mimo čistícího vozu je na záznamu také řada dalších zvuků jako cvaknutí, bouchnutí či klepnutí, přičemž některé z nich patrně přímo nesouvisí s trvalou činností čistícího vozu. Tyto typy zvuků jsou vyznačeny v záznamu zvukového signálu zobrazeném na obr. 24.



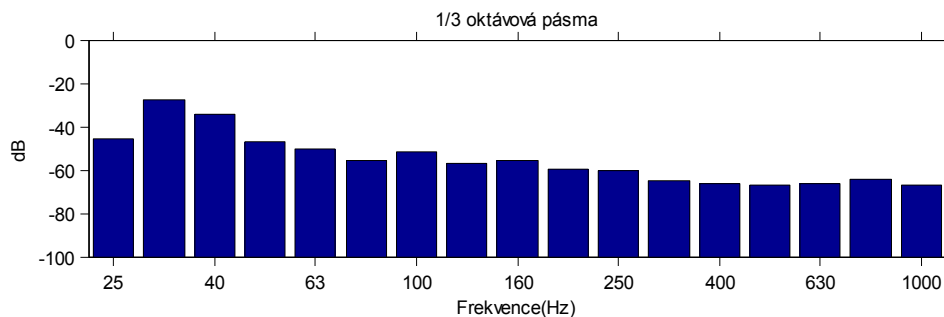
**Obr. 24** Audiozáznam *CisticiVuz.wav* (filtrovány frekvence pod 6 Hz).

Z hlediska frekvenčního obsahu má záznam nízkofrekvenční charakter, a proto je jeho amplitudové spektrum (obr. 25) zobrazeno pouze do frekvence 200 Hz. Při zvýšení počtu bodů *FFT* jsou ještě více zdůrazněny ve spektru hlavní frekvence (obr. 25, dole). Zvukový signál je tedy složen především z frekvencí okolo 10 Hz a 35 Hz. V těchto dvou frekvenčních oblastech není vidět pouze jeden vrchol v konkrétní frekvenci, ale vyskytuje se zde více frekvenčních složek. *FFT* dává přehled o rozložení frekvencí v celém signálu a nikoliv v určitém krátkém časovém intervalu. Ve spektrogramu na obr. 33 lze pozorovat distribuci frekvencí v čase a jejich změnu kolem uvedených frekvenčních oblastí.



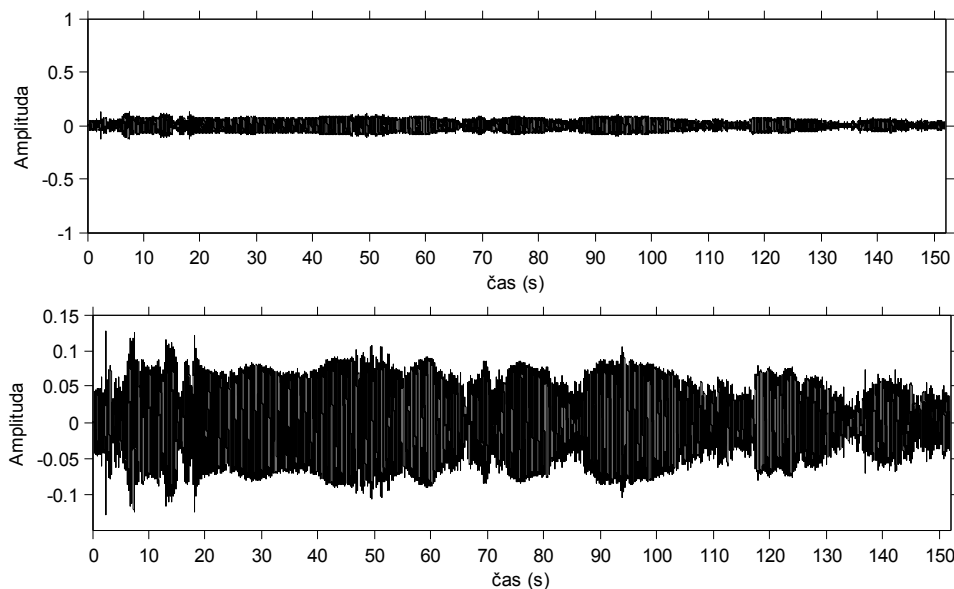
**Obr. 25** Odhad amplitudového spektra záznamu *CisticiVuz.wav*. Nahoře:  $k = 65\,536$ , dole:  $k = 2\,097\,152$ .

Frekvenční analýza v 1/3 oktávových pásmech je zobrazena na obr. 26. Zde je možné pozorovat největší množství energie v pásmu se střední frekvencí 31,5 Hz. U tohoto typu spektra je však výrazně snižovaná rozlišovací schopnost pro rozpoznání izolovaných frekvenčních složek. Proto je pro podrobnou identifikaci významných frekvencí vhodnější *FFT* analýza.



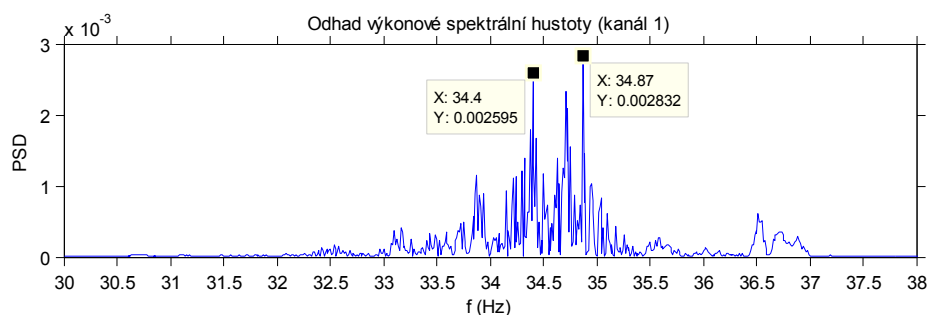
**Obr. 26** 1/3 oktávová analýza nahrávky *CisticiVuz.wav* se zobrazením frekvenčních pásem v rozmezí od 25 do 1000 Hz.

Na následujícím obr. 27 je zobrazen zvukový signál po filtraci frekvencí pod 25 Hz a nad 40 Hz. Na zvukovém záznamu je zachycen především čistící vůz při provádění práce, ostatní zvuky byly výrazně potlačeny nebo zcela odstraněny. Je tedy zřejmé, že frekvenční složka s hodnotou okolo 30 Hz patří právě čistícímu vozu.



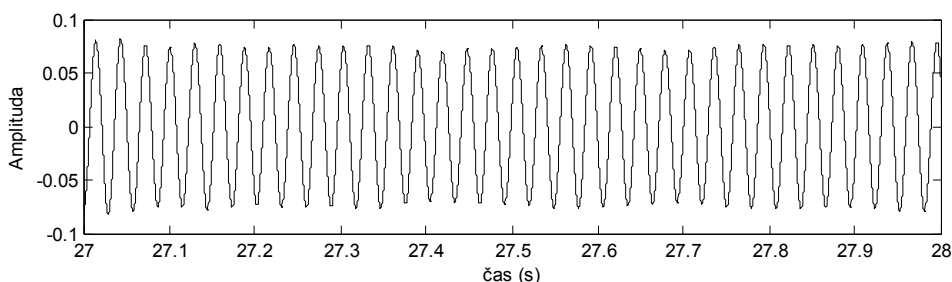
**Obr. 27** Audiozáznam *CisticiVuz.wav* (filtrovány frekvence pod 25 Hz a nad 40 Hz).

Na obr. 28 je zobrazen odhad *PSD* záznamu po filtraci, s výrazným maximem ve frekvenci cca 35 Hz. Na začátku zvukového signálu se objevuje asi do 19 s větší kolísání akustického tlaku, které ovlivnilo zvuk generovaný čistícím strojem. Dále je zaznamenán již poměrně ustálený zvuk stroje s minimem rušení.



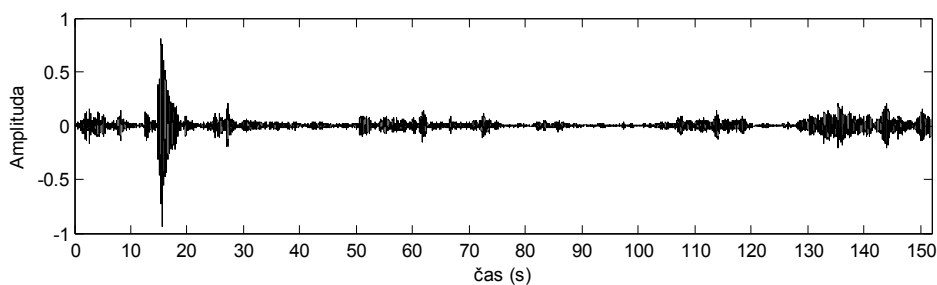
**Obr. 28** Odhad PSD filtrovaného audiozáznamu *CisticiVuz.wav*.

Na základě odhadu spektra lze čistícímu vozu přiřadit frekvenci cca 35 Hz. Pro ukázkou je na obr. 29 vykreslen sekundový průběh zvukového záznamu, konkrétně časový úsek od 27 do 28 sekundy, na kterém lze pozorovat přibližně sinusový průběh filtrovaného signálu s frekvencí cca 35 Hz.



**Obr. 29** Detail sekundového záznamu *CisticiVuz.wav* s potlačením frekvencí pod 25 Hz a nad 40 Hz.

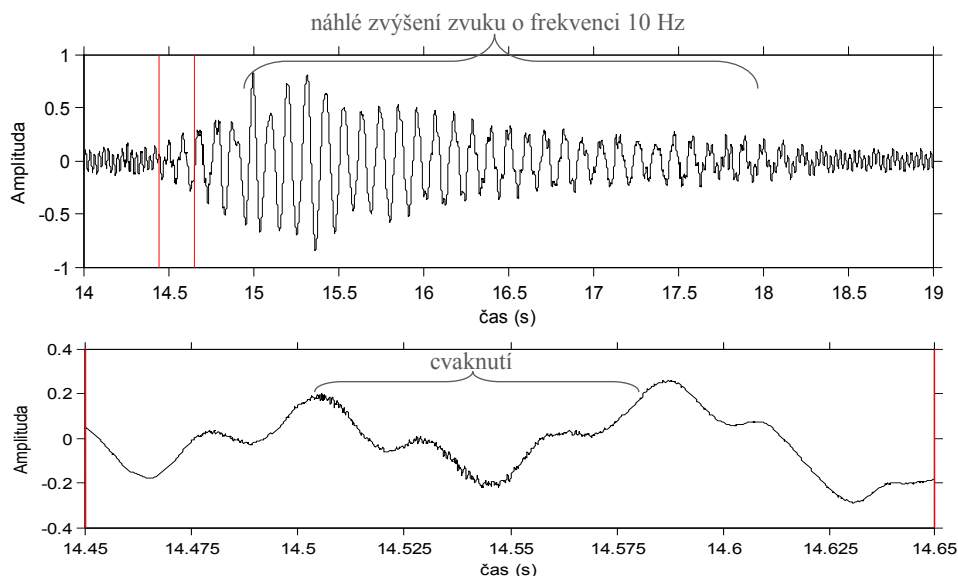
Filtrovaný zvukový signál z obr. 24 s úpravou propustného pásma od 6 do 15 Hz je zobrazen na obr. 30. Zobrazené zvuky jsou tedy tvořeny frekvencemi v tomto rozsahu. Stejně jako v původním signálu se i zde vyskytuje výrazný zvuk v čase okolo 15té sekundy. Tato oblast je



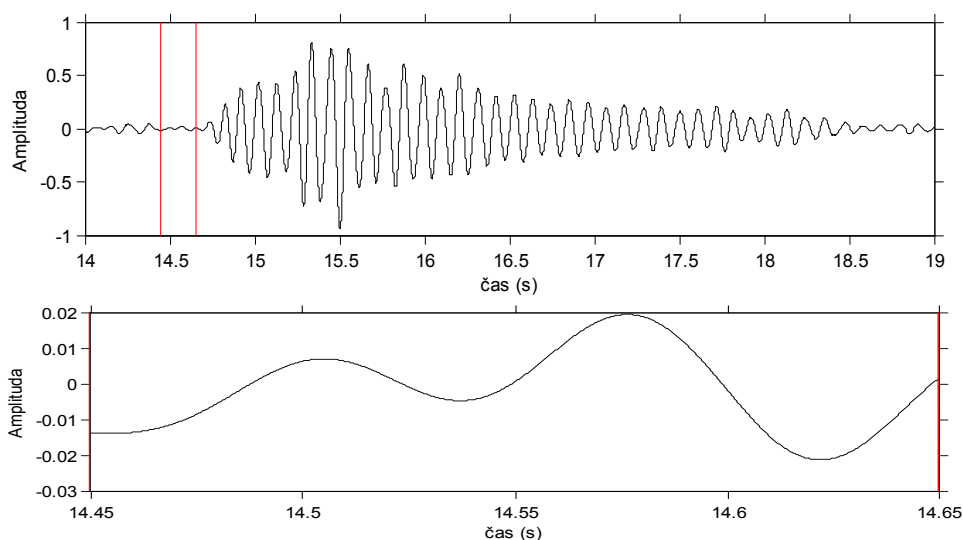
**Obr. 30** Audiozáznam *CisticiVuz.wav* (filtrovány frekvence pod 6 Hz a nad 15 Hz).

přibližena na následujících obrázcích. Na obr. 31 (nahore) je zobrazen časový úsek původního signálu z obr. 24. Zde je zachycen zvuk čistícího vozu. V oblasti vymezené červenými vertikálními čarami se nachází zvuk typu cvaknutí, který je i přes malou amplitudu dobře slyšitelný. Tento zvuk je podstatně vyšší frekvence a je superponován na pomalejší frekvenci čistícího vozu. V 15té sekundě se objevuje ještě výraznější zvuk, který trvá až do cca 18,5 s. Tento zvuk o nižší frekvenci cca 10 Hz se rovněž vyskytuje v průběhu celého záznamu, a proto lze předpokládat, že také souvisí s čistícím vozem a jeho vykonávanou prací. V uvedeném okamžiku došlo z neznámých příčin

k jeho náhlému zesílení, což se v nahrávce projevuje jako slyšitelné a postupně se tlumící chvění. Na obr. 32 (nahore) je vykreslen stejný časový úsek signálu z obr. 31, kde je již slyšitelný zvuk s frekvencí 35 Hz pocházející z čističe i zvuk typu cvaknutí odfiltrován.

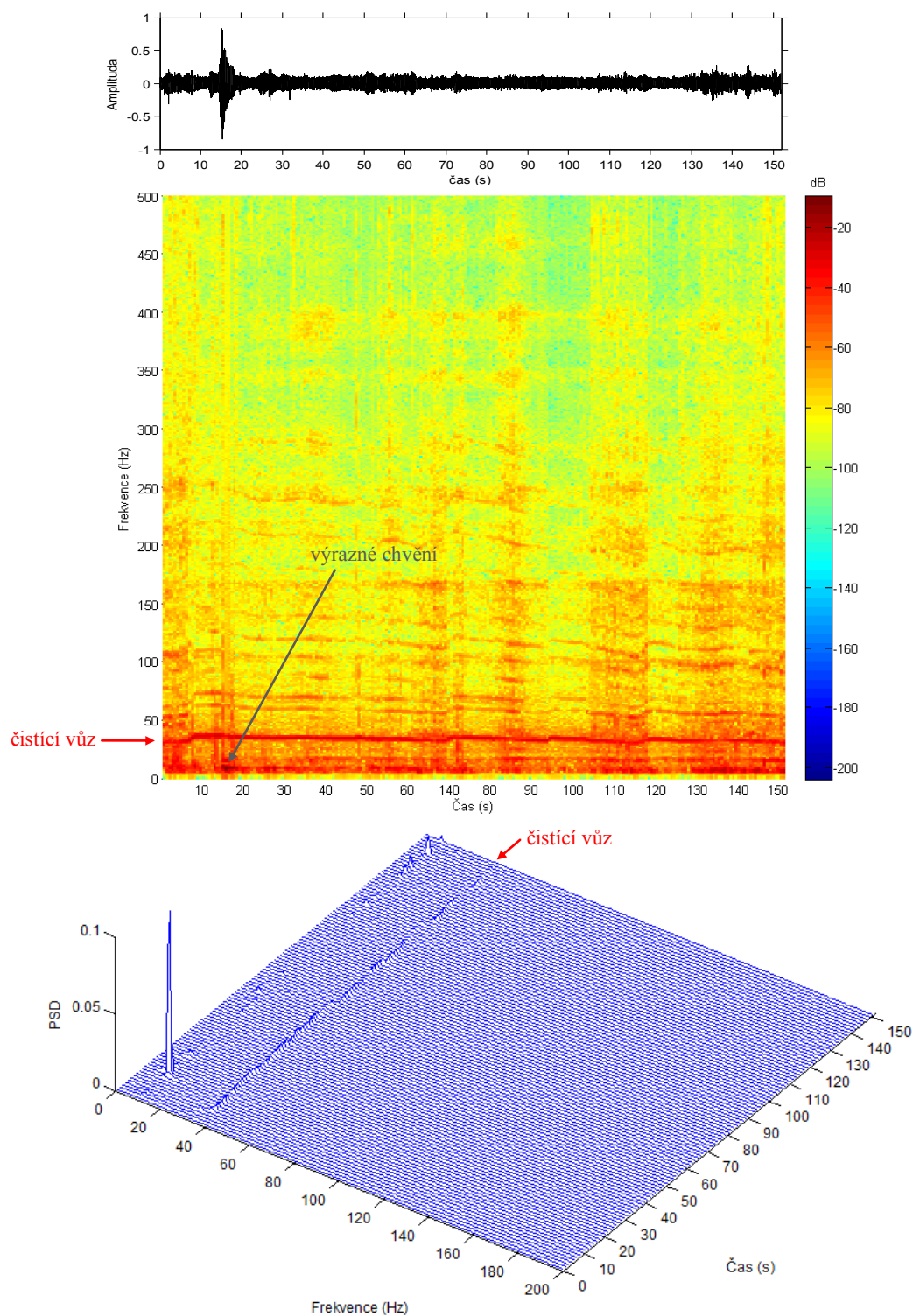


**Obr. 31** *Nahore:* vybraný úsek záznamu od 14 do 19 s. *Dole:* detail úseku se zvukem cvaknutí.



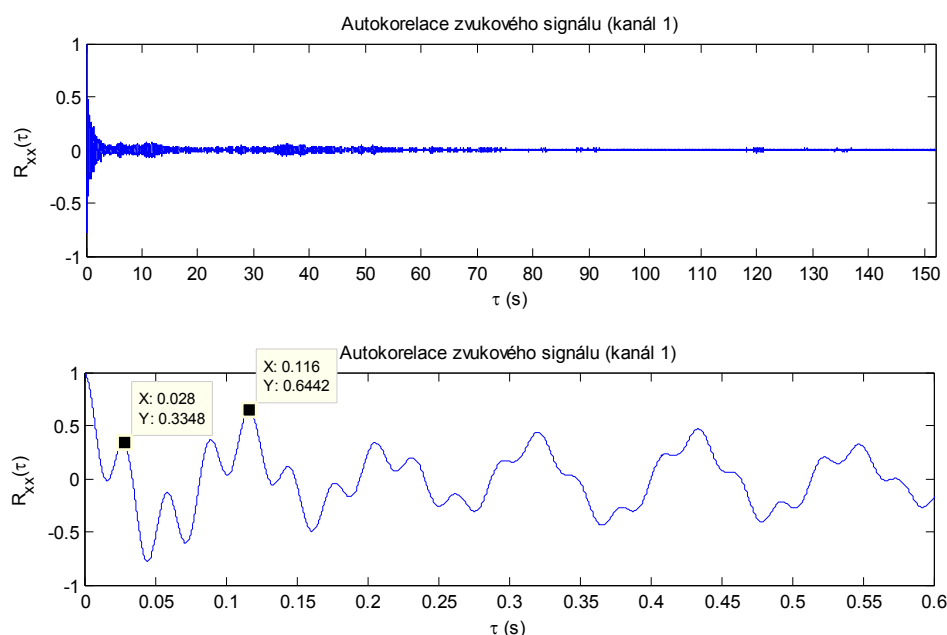
**Obr. 32** *Nahore:* vybraný úsek záznamu od 14 do 19 s. *Dole:* detail úseku, kde bylo původně cvaknutí.

Nejen uváděné nízké frekvence, ale také vyšší frekvence se vyskytují téměř kontinuálně v celém záznamu, což je dobře patrné na spektrogramu na obr. 33. Proto lze předpokládat, že i tyto frekvence jsou generovány čisticím vozem, tj. jeho vlastním provozem a doprovodnými činnostmi.



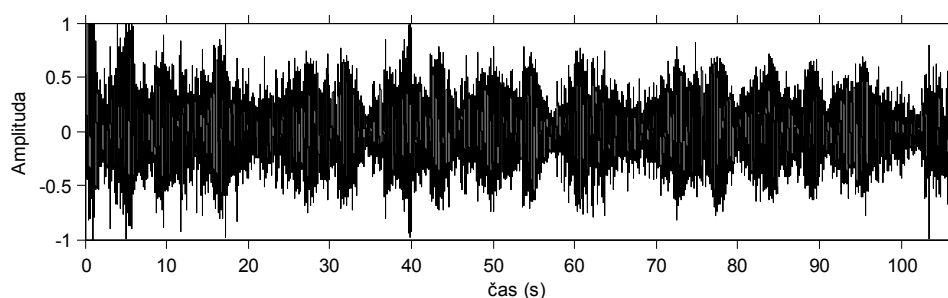
**Obr. 33** *Nahoře:* časový průběh signálu. *Uprostřed:* spektrogram zvukového záznamu 0 až 500 Hz. *Dole:* spektrogram záznamu v 3D zobrazení (rozsah frekvencí 0 až 200 Hz).

Existenci periodicity zvukového signálu na záznamu, resp. výskytu opakujícího se úseku lze ověřit například pomocí autokorelace záznamu (obr. 34). Autokorelační funkce je tvořena málo výraznými lokálními maximy. Nicméně po přiblížení funkce se v jejím průběhu vyskytují vrcholy, které poukazují na existenci dvou možných period, a to s hodnotami 0,028 s a 0,116 s.



**Obr. 34** Autokorelační funkce zvukové nahrávky *CisticiVuz.wav*.

Další analyzovaná reálná nahrávka s názvem *Drums.wav* je výsledkem měření produkce živé hudby uvnitř kulturního domu, přičemž vlastní měření je realizováno ve venkovním prostředí před zmiňovanou budovou. Tento zvukový záznam v čase s již provedenou filtrací frekvencí do 6 Hz je vykreslen na obr. 35. Obsažen je zde zejména zvuk v podobě řeči a hudby. Hudba na záznamu, která je charakteristická výrazným obsahem basů a tedy nízkých frekvencí, se vyskytuje v průběhu celého záznamu. Tato nahrávka je však velmi zašuměná a jen velmi obtížně lze rozpoznat a konkretizovat obsažené zvuky. Pravděpodobně jsou však tyto nízké frekvence produkovány bicími nástroji. Výraznější je řeč mnoha komunikujících osob, která se také objevuje během celého záznamu. Na začátku nahrávky v prvních cca 7 sekundách je pak dominantní řeč osoby pořizující tento záznam. Jedná se o mluvčího mužského pohlaví.

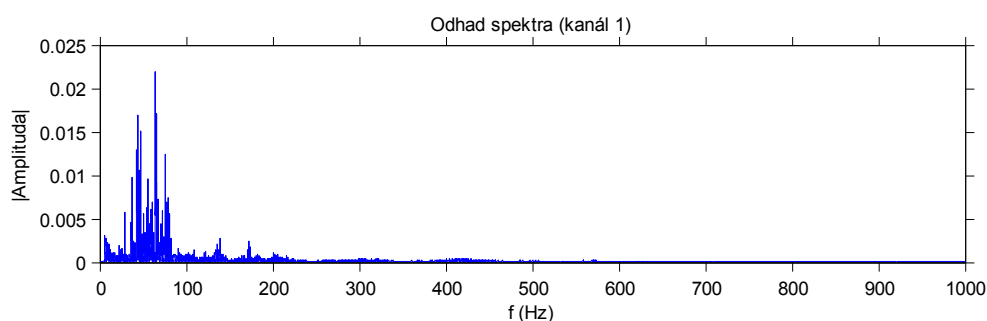


**Obr. 35** Audiozáznam *Drums.wav* (filtrovány frekvence pod 6 Hz).

Z hlediska frekvenčního rozsahu se lidská řeč pohybuje v rozmezí přibližně 100 až 8000 Hz, nejběžněji do 5000 Hz, přičemž se základní frekvence  $f_0$  nachází okolo 100 Hz u mužů a 200 Hz u žen. Většina energie přenášená lidskou řečí je obsažena ve středních frekvencích, přibližně do 500 Hz u mužů a 800 Hz u žen. Nicméně právě tyto frekvence jsou nejméně důležité pro porozumění řeči. Při odstranění všech frekvencí nad 500 Hz se mluva stává nesrozumitelnou. Naopak při filtraci frekvenčních složek pod 500 Hz je reprodukována řeč tišší, avšak stále srozumitelná. [22], [73], [74]

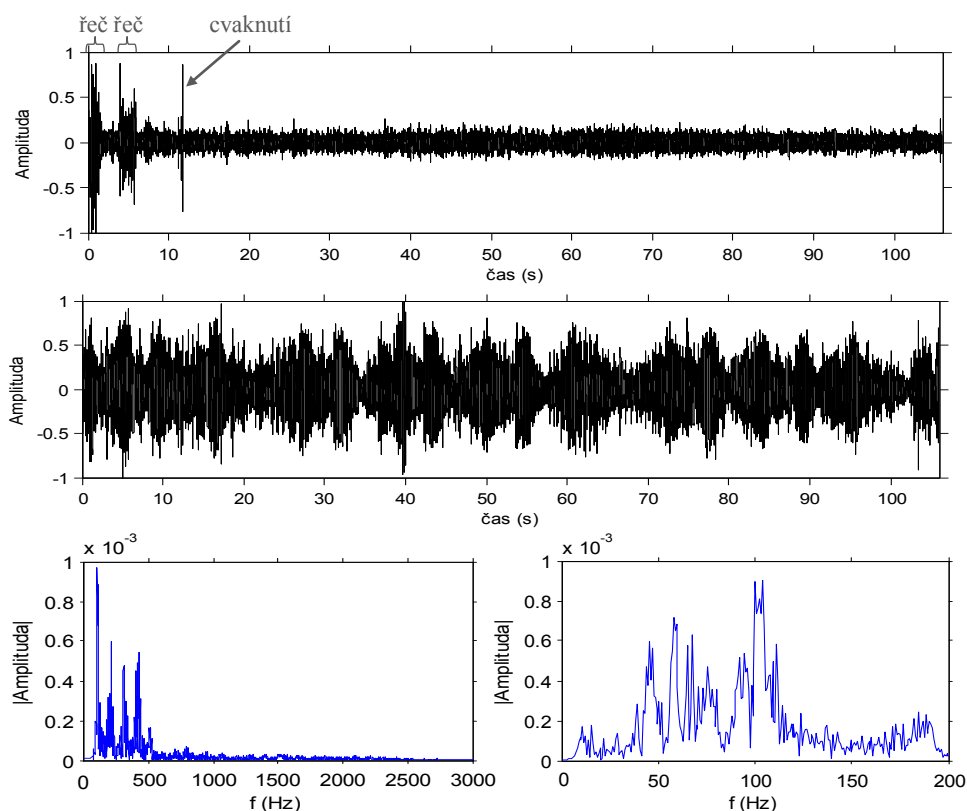
Platnost uvedené skutečnosti byla prostřednictvím filtrace a následné reprodukce nahrávky potvrzena i v případě tohoto konkrétního záznamu.

Odhad amplitudového spektra zvukového záznamu je na obr. 36. Jsou zde znázorněny pouze frekvence do 1000 Hz, neboť vyšší frekvence již jsou z hlediska velikosti amplitud zcela zanedbatelné. Počet  $k$  bodů *FFT* je nastaven na 4 194 304 a frekvenční krok  $\Delta f$  je tak 0,0114 Hz. Zvukový záznam obsahuje výrazný podíl nízkých frekvencí do cca 100 Hz. Tyto nízké frekvence jsou frekvence odpovídající reprodukované hudbě. Ta však obsahuje také frekvenční složky vyšší než 100 Hz, které se navzájem překrývají s frekvencemi náležícími řeči. Filtrací tedy není možné zcela odstranit řeč nebo hudbu, aniž by nedošlo k ovlivnění obou. To lze pozorovat na obr. 37 (nahore), kde je zobrazen zvukový záznam po filtraci pásmovou propustí s nastavením propustného pásma 90 až 5000 Hz. Při poslechu tohoto filtrovaného záznamu lze stále slyšet hudbu. Odpovídající amplitudové spektrum je na obr. 37 (dole, vlevo). Nejvyšší vrchol ve frekvenci 100 Hz představuje základní frekvenci  $f_0$  mužského hlasu na záznamu. Následující maxima jsou pak výrazné harmonické frekvence hlasu  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$  a  $f_4$ , které mají periodu přibližně 100 Hz. První harmonickou frekvencí  $f_1$  je tedy frekvence 200 Hz a čtvrtou harmonickou  $f_4$  je frekvence 500 Hz. Kromě těchto výrazných frekvencí jsou v lidském hlasu obsaženy i další vyšší harmonické frekvence nad 500 Hz, jejichž amplituda se stále zmenšuje. Kvůli relativně výraznému šumu v nahrávce jsou však ve spektru tyto frekvence šumem maskovány. Proto také odhad frekvencí řeči může být zkreslený přítomným šumem. Vliv mohou mít také hlasy jiných mluvčích, které jsou obsaženy ve filtrovaném záznamu nebo i samotná hudba.



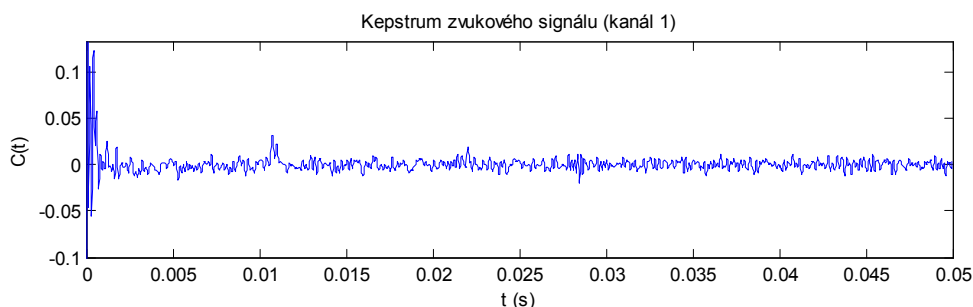
**Obr. 36** Odhad amplitudového spektra záznamu *Drums.wav*.

Při filtraci záznamu s cílem zachování pouze hudebních zvuků, tedy s nastavením propustného pásma 6,3 až 200 Hz, nedochází v audiozáznamu k úplnému odstranění řeči (obr. 37, uprostřed). Nicméně je zde zřejmý její útlum a naopak zdůraznění hudby s obsahem basů. Na obr. 37 (dole) jsou zobrazena amplitudová spektra filtrovaného záznamu uvedenými pásmovými filtry.



**Obr. 37** Filtrovaný záznam *Drums.wav* a jeho spektra. *Nahoře*: Propustné pásmo 90 až 5000 Hz. *Uprostřed*: Propustné pásmo 6,3 až 200 Hz. *Dole*: Amplitudová spektra filtrovaných signálů, s propustným pásmem 90 až 5000 Hz (vlevo) a 6,3 až 200 Hz (vpravo).

Vhodným příkladem využití cepstrální analýzy je výpočet základní periody řečového signálu, resp. hlasu mluvčího. Na obr. 38 je znázorněno cepstrum znělé části řečového signálu z obr. 37 (nahore), konkrétně hlásky „y“. V časové oblasti kolem cca 0,01 sekund se nachází výrazné maximum, které náleží základní periodě hlasu na záznamu. Tato hodnota tedy odpovídá frekvenci přibližně 100 Hz.

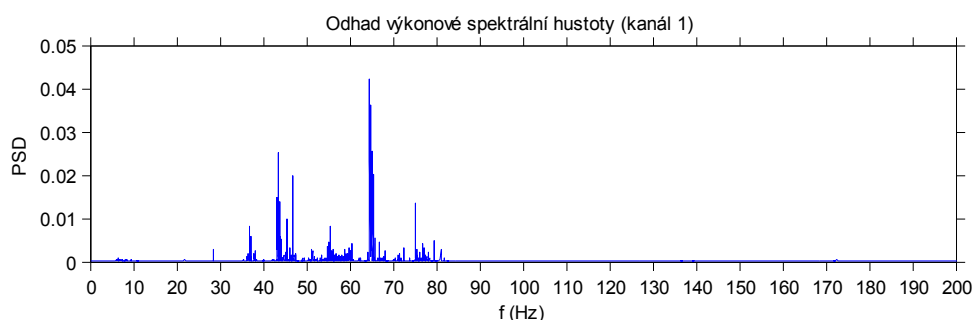


**Obr. 38** Cepstrum řečového úseku hlásky „y“.

Amplitudová spektra na obr. 37 (dole) jsou výsledkem 65 536 bodové *FFT* s frekvenčním krokem  $\Delta f$  0,73Hz, což je naprosto dostačující frekvenční rozlišení pro řeč. Nicméně u filtrovaného záznamu na obr. 37 (uprostřed), resp. jeho amplitudového spektra na obr. 37 (dole, vpravo) je potřeba zvýšit počet bodů *FFT*.

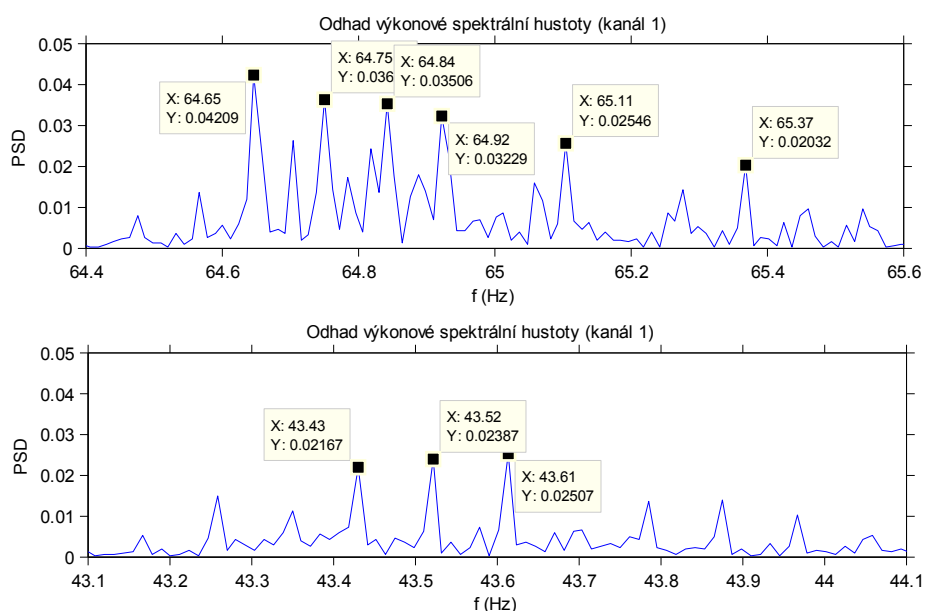


U tohoto filtrovaného záznamu je vhodnější využít místo výpočtu amplitudového spektra odhad výkonové spektrální hustoty obr. 39, která lépe zvýrazní dominantní spektrální složky a naopak potlačí málo výrazné frekvenční složky a také šum. [8] Nejvýraznější frekvence jsou zde v oblasti kolem 65 Hz a 43 Hz.



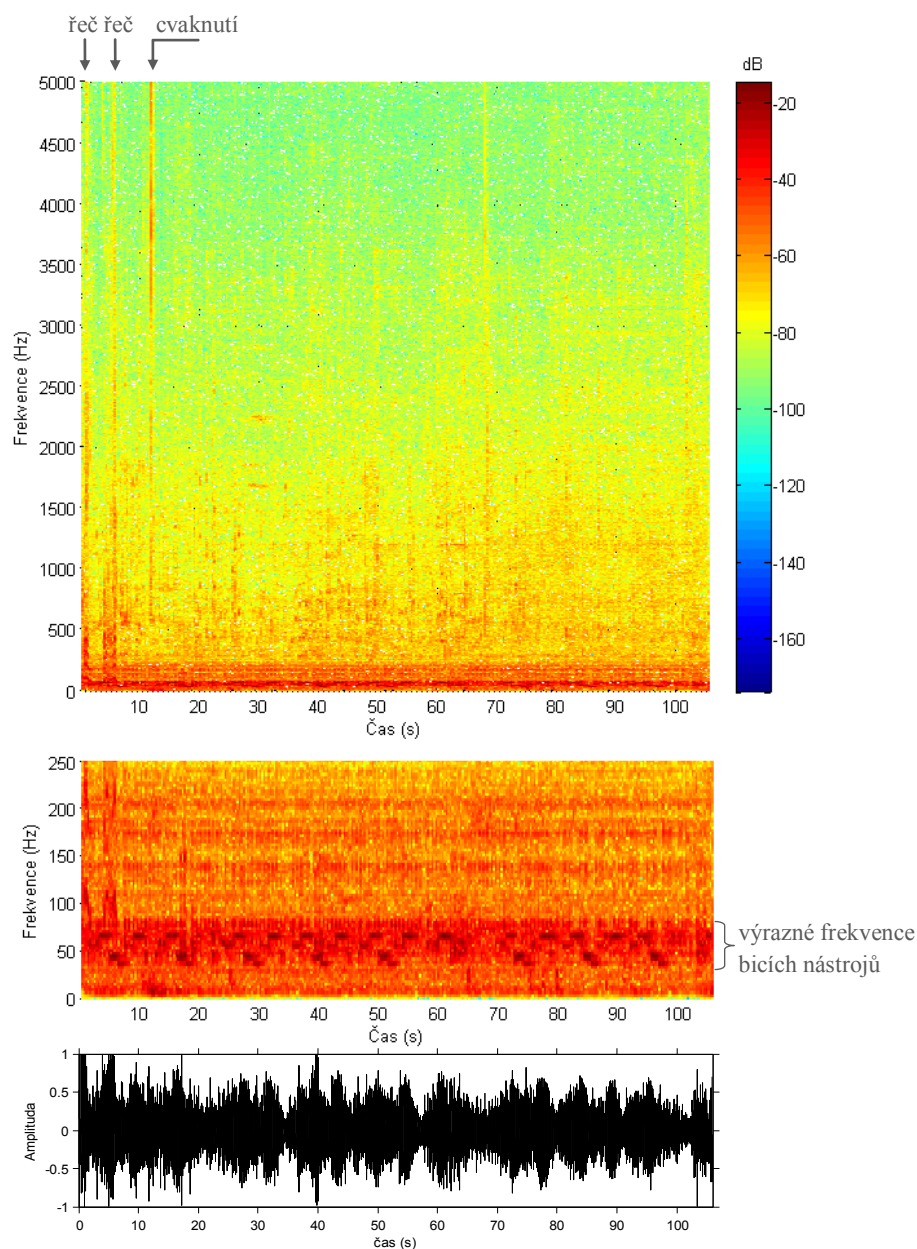
**Obr. 39** Odhad  $PSD$  s nastaveným propustným pásmem 6,3 až 200 Hz (4 194 304 bodová FFT).

Detailní pohled na spektra v uvedených frekvenčních oblastech je na následujících obrázcích. Zvuky generované bicími nástroji jsou tvořeny mnoha frekvencemi, které se nacházejí nad i pod základní frekvencí, a to také v oblastech spektra, které jsou výrazné na této nahrávce. V případě, že by produkovalo zvuk více bubnů, jejich frekvenční spektra by se mohla navzájem částečně nebo zcela překrývat a vytvářet ve výsledném spektru mnoho výrazných maxim. Zvuky o nízkých frekvencích jsou produkovány především basovými bubny a floor tomy. Složení bicí soupravy včetně příslušných rozsahů frekvencí je uvedeno dále v textu u analýzy k nahrávce *HudbaVzdalena.wav*.



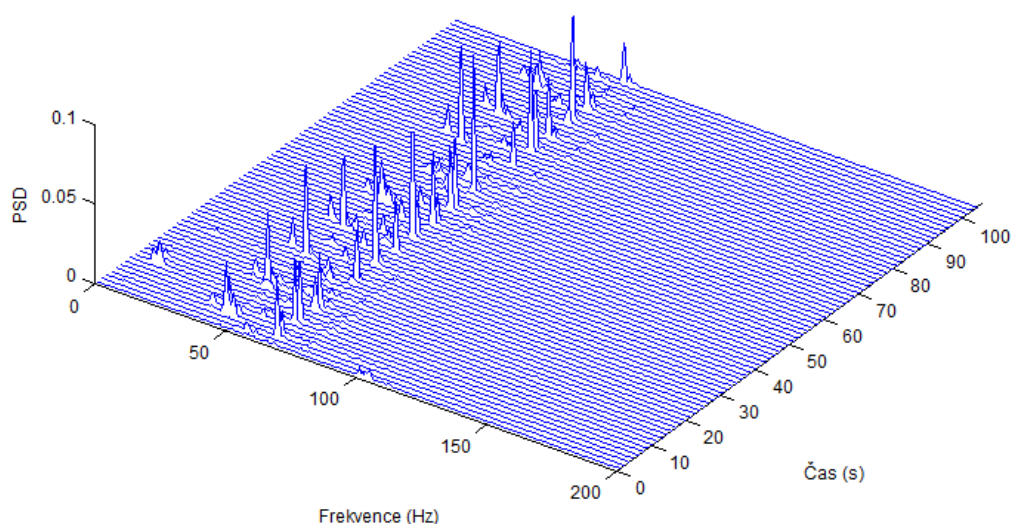
**Obr. 40** Detail odhadu  $PSD$  filtrovaného záznamu *Drums.wav* (propustné pásmo 6,3 až 200 Hz) v rozmezí 64,4 až 65,6 Hz (nahore) a 43,1 až 44,1 Hz (dole).

Pro sledování vývoje frekvencí v čase je vypočítán a vykreslen spektrogram zvukového signálu obsaženém v audiozáznamu *Drums.wav* (obr. 41). Většina energie přenášená zvukovým signálem je obsažena ve frekvencích asi do 200 Hz. Na výřezu spektrogramu zobrazujícím časovou distribuci frekvencí 0 až 250 Hz lze v oblasti okolo frekvence 50 Hz pozorovat určitou periodičnost frekvencí, v tomto případě rytmus produkované hudební skladby.



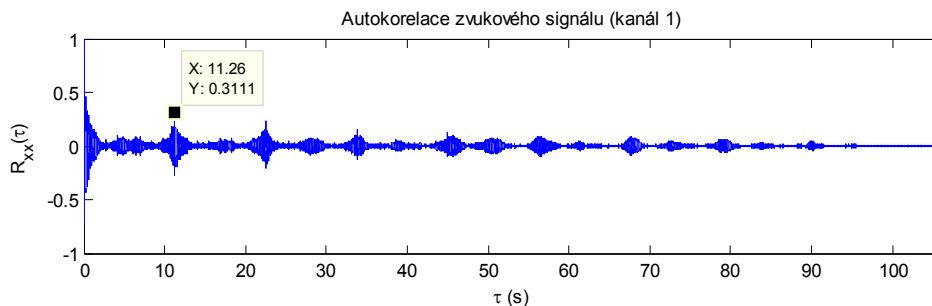
**Obr. 41** *Nahoře:* Spektrogram zvukového záznamu 0 až 5000 Hz. *Uprostřed:* Detail spektrogramu 0 až 250 Hz. *Dole:* Časový průběh zvukového signálu.

Na spektrogramu v 3D zobrazení (obr. 42) lze rovněž pozorovat nejvýraznější frekvence v nízkofrekvenční oblasti okolo 50 Hz, které náleží bicím nástrojům.



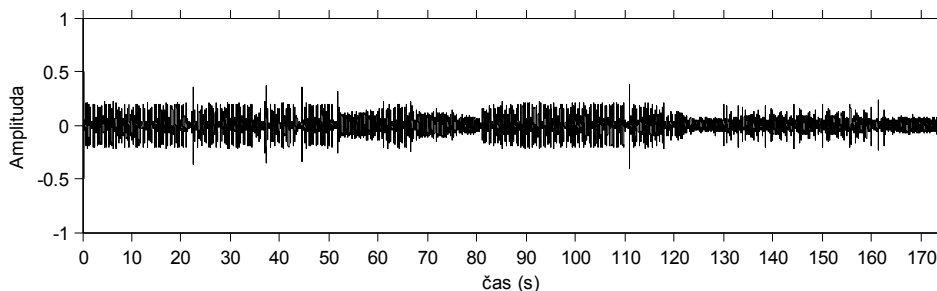
**Obr. 42** Spektrogram záznamu *Drums.wav* v 3D zobrazení (rozsah frekvencí 0 až 200 Hz).

Na autokorelační funkci na obr. 43 jsou patrná maxima, která značí výskyt periodičnosti v signálu. Základní perioda je dle této funkce cca 11 s. Úseky signálu opakujícího se s touto periodou je možné pozorovat také v časovém záznamu.



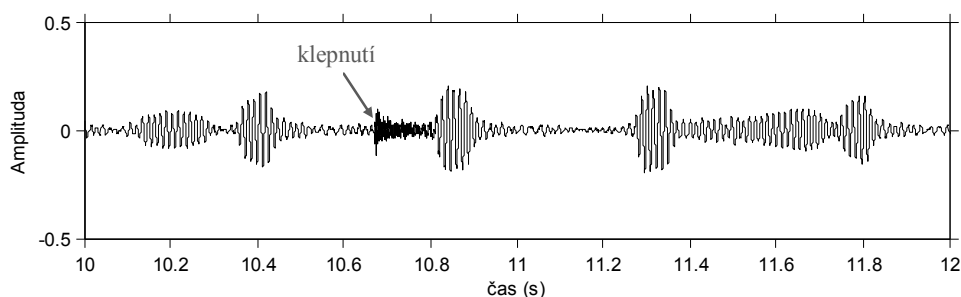
**Obr. 43** Autokorelační funkce zvukové nahrávky *Drums.wav*.

Dále je analyzována audio nahrávka *HudbaTechno.wav*, jejíž časový průběh je vykreslen obr. 44. Jde o záznam reprodukováné hudby ve stylu techno, což je rychlejší druh elektronické taneční hudby vytvořené elektronickými nástroji, např. syntezátory a nejrůznějšími softwarovými nástroji. Záznam je pořízen z přízemí budovy, kde byla hudba (zdroj zvuku) reprodukována prostřednictvím reprosoustavy se subwooferem, který zdůrazňuje nízké (basové) frekvence. Měřicí mikrofón byl umístěn v jiné, vzdálenější místnosti v přízemí téže budovy.



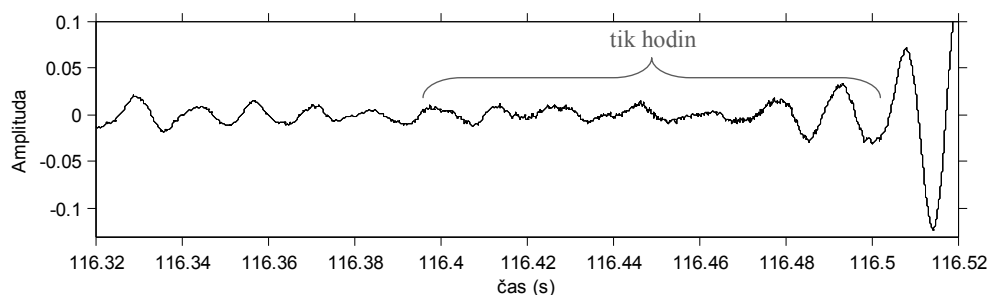
**Obr. 44** Audiozáznam *HudbaTechno.wav* (filtrovány frekvence pod 6 Hz).

Zvukový signál je tvořen převážně pulsacemi, které jsou různě modifikovány v čase. Na obr. 45 je znázorněn dvousekundový úsek signálu, včetně zaznamenaného zvuku v podobě klepnutí.



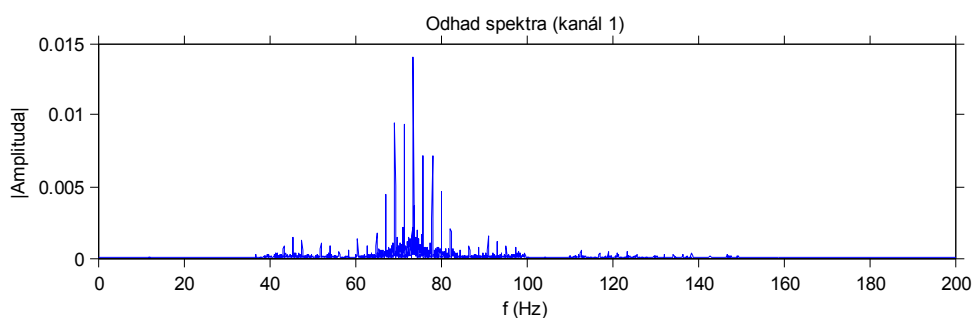
**Obr. 45** Dvousekundová část zvukového záznamu *HudbaTechno.wav*.

Kromě hudby se v nahrávce vyskytuje zvuk v podobě tikotu hodin, konkrétně zvuk pohybující se vteřinové ručičky. Tyto hodiny jsou pravděpodobně umístěny v měřící místnosti, ale kvůli výrazné techno hudbě je jejich zvuk potlačen. Na obr. 46 je znázorněn malý úsek záznamu, ve kterém je obsažen jeden tik hodin. Ten se v záznamu poprvé objevuje v cca 0,4 s a dále pak v 1 s intervalech po celou dobu trvání záznamu. Zvuk tikání hodin má velmi malou amplitudu a vyšší frekvenci, a proto je ve zvukovém signálu v daných okamžicích superponován na nižší (pomalejší) frekvenci hudební reprodukce.



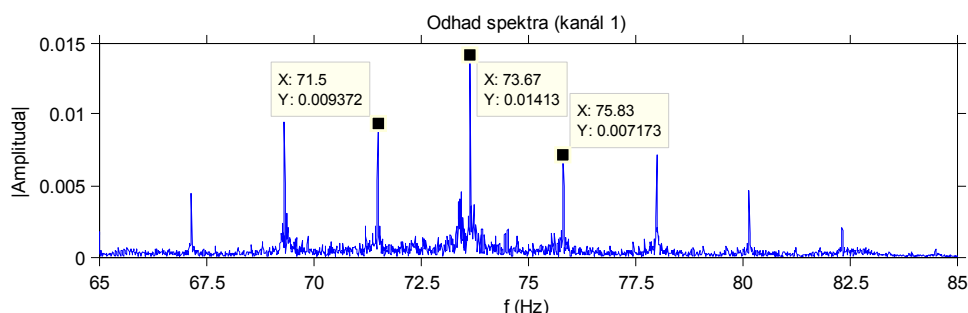
**Obr. 46** Úsek záznamu se zachyceným tiknutím hodin.

Výpočet odhadu amplitudového spektra pomocí *FFT* a následné vykreslení spektra prokázaly existenci dominantních frekvencí v nízkofrekvenční oblasti, konkrétně mezi 65 a 85 Hz.



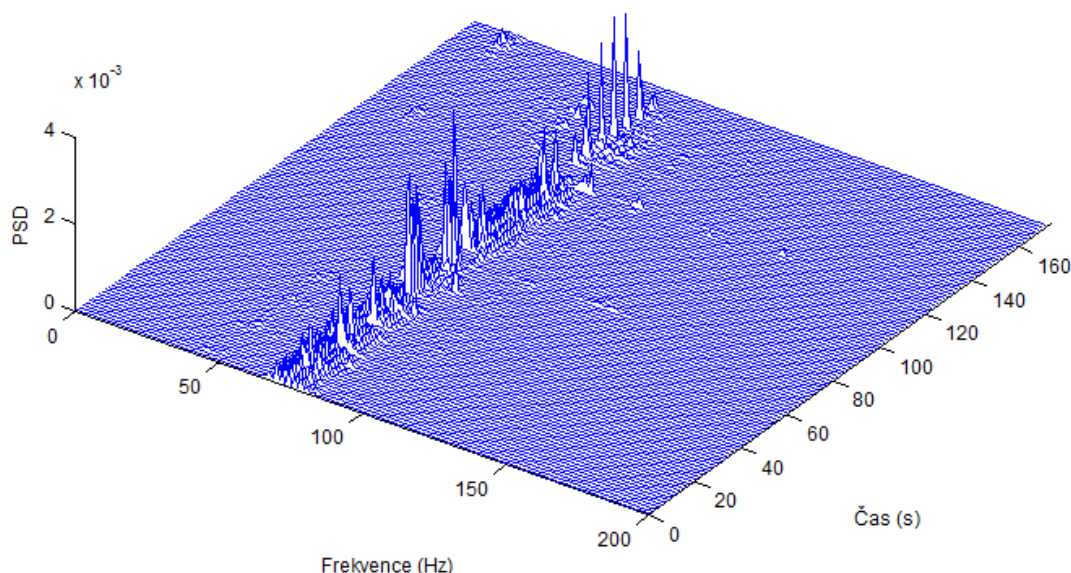
**Obr. 47** Odhad amplitudového spektra záznamu *HudbaTechno.wav*.  $k = 4\,194\,304$ .

Detailní pohled na odhad amplitudového spektra ve frekvenčním rozsahu 65 a 80 Hz je na obr. 48. Hlavní frekvenci obsaženou v tomto konkrétním zvukovém signálu je frekvence přibližně 74 Hz. Frekvence o hodnotách cca 69 Hz, 72 Hz, 76 Hz a 78 Hz jsou také výrazné. Vzájemný rozdíl dvou sousedních frekvencí je tedy okolo 2 Hz.



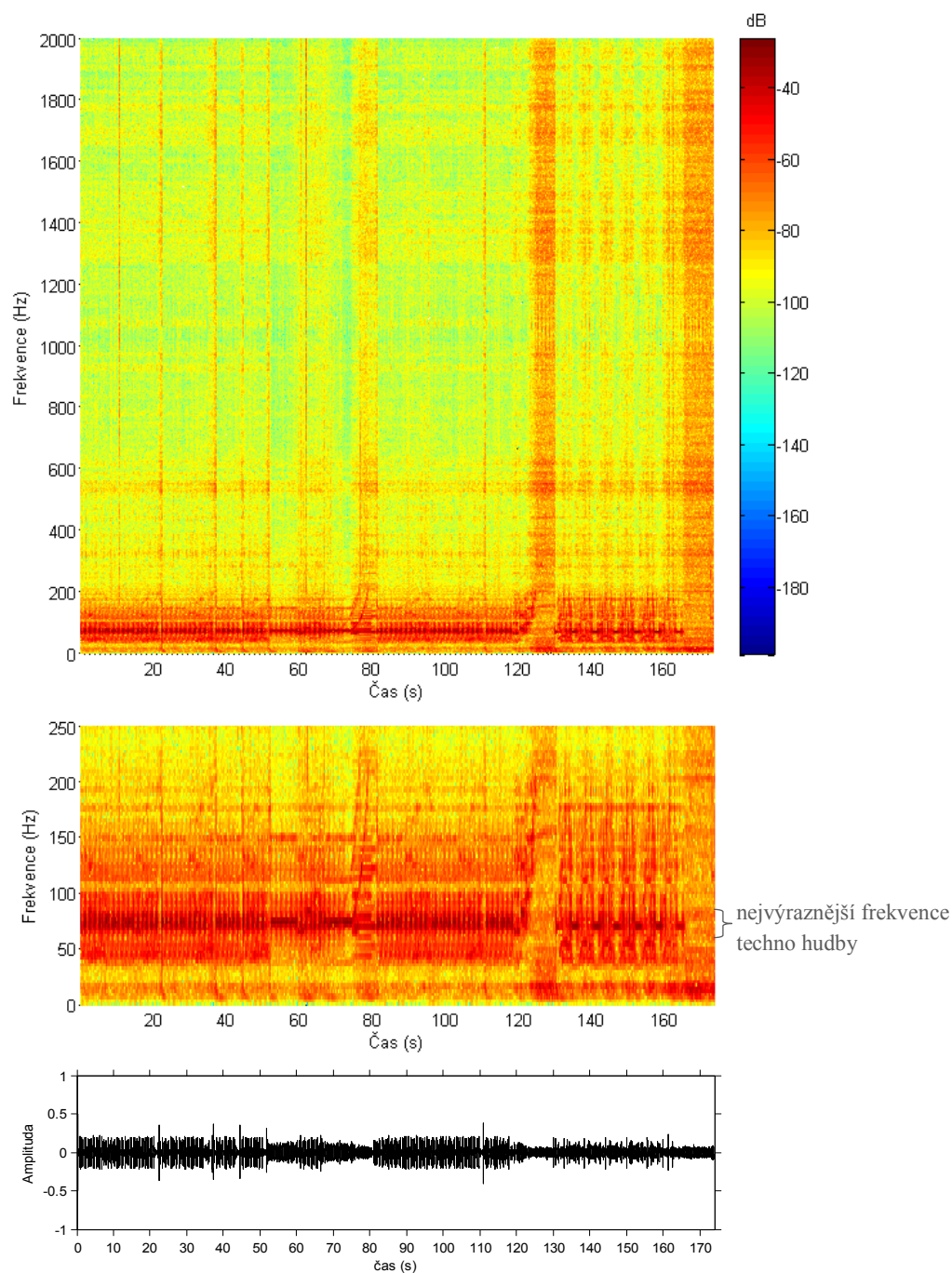
**Obr. 48** Odhad amplitudového spektra záznamu *HudbaTechno.wav* (detailnější pohled).

Pro upřesnění výskytu frekvenčních složek v čase jsou na následujících obrázcích vykresleny spektrogramy audiozáznamu v 3D a 2D zobrazení. Na obou spektrogramech je vidět okolo 75 Hz pásmo výrazných frekvencí. V barevném rozložení *PSD* frekvencí na obr. 50 (nahore a uprostřed) lze pozorovat tempo elektronické hudební skladby. Na tomtéž obrázku jsou také viditelné časové segmenty, v nichž dochází k útlumu hudby v důsledku delší pauzy či změně rytmu. V těchto úsecích dochází k výraznému zesílení šumu, který je přítomný v celé nahrávce, ale z důvodu silnější hudby je potlačen. Jsou to především úseky mezi časy 120 a 130 s a také na konci nahrávky, tj. přibližně od 165 s.



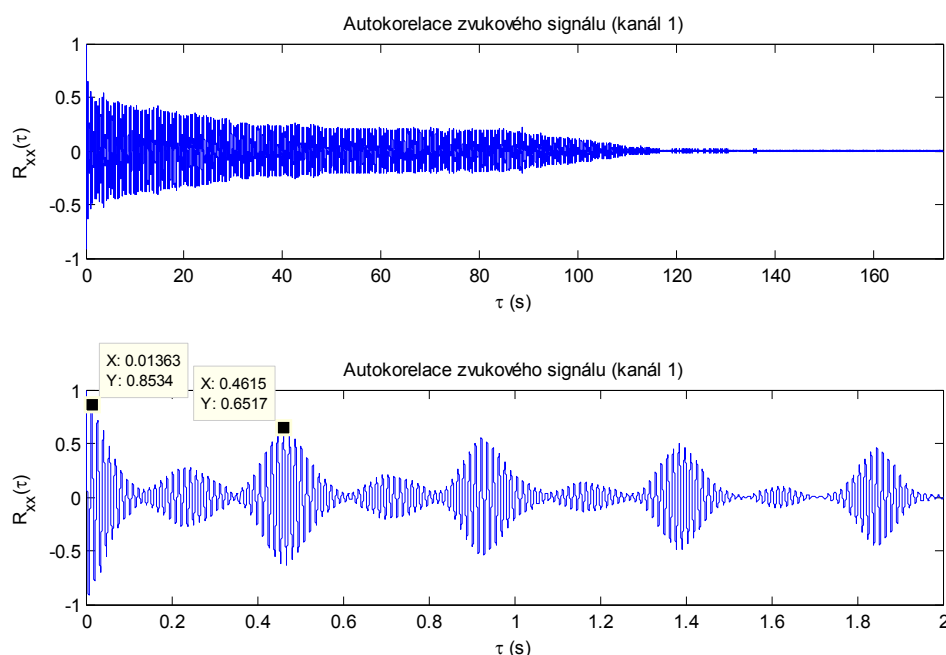
**Obr. 49** Spektrogram záznamu *HudbaTechno.wav* v 3D zobrazení (rozsah frekvencí 0 až 200 Hz).





**Obr. 50** *Nahoře:* Spektrogram zvukového záznamu 0 až 2000 Hz. *Uprostřed:* Detail spektrogramu 0 až 250 Hz. *Dole:* Časový průběh zvukového signálu *HudbaTechno.wav*.

Autokorelace celého zvukového záznamu (obr. 51, nahoře) prokázala výskyt periodicity v signálu. Pro zjištění hlavní periody zvukového signálu je nutné zmenšit rozsah horizontální osy, aby došlo k přiblížení autokorelační funkce (obr. 51, dole). V signálu se tak vyskytuje úsek záznamu, který se opakuje v čase s periodou cca 0,4615 s a 0,01363 s.

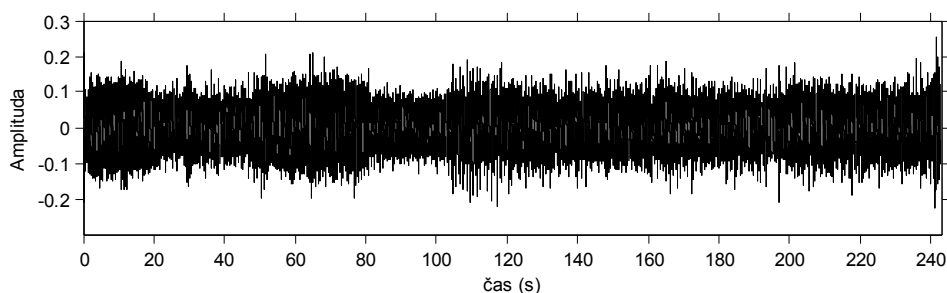


**Obr. 51** Autokorelační funkce audiozáznamu. *Nahoře:* Celý průběh. *Dole:* Detailní zobrazení.

Další analyzovaný zvukový signál je uložen v audiosouboru s názvem *HudbaVzdalena.wav*. Zaznamenaný zvukový signál je složen z více dílčích zvuků a výrazného šumového pozadí generovaného měřicí technikou. Živá hudba produkovaná neznámou skupinou nejspíše s jedním hlavním zpěvákem je zde klíčovým zvukem, který se vyskytuje v celém záznamu. Počet zpěváků i jednotlivé nástroje je obtížné rozpoznat, neboť zvuk přichází z větší vzdálenosti. Dominantní jsou zde bicí nástroje. Podstatně více tlumený, ale stále rozeznatelný je pak zvuk vytvářený elektrickou kytarou. Pravděpodobně se jedná o hudební žánr rock. Výrazný útlum vyšších frekvencí a naopak zvýraznění nízkých (basových) frekvencí je jasným ukazatelem toho, že zdroj zvuku (rocková hudba) je vzdálen od záznamového zařízení (zvukoměr).

Na audionahrávce jsou zachyceny také zvuky jako potlesk a jásot davu lidí, rušivé zvuky, které jsou způsobeny manipulací s měřicím zařízením nebo zvuky vydávané exotickým ptactvem. Poslední jmenovaný typ zvuku se vyskytuje především v druhé části záznamu.

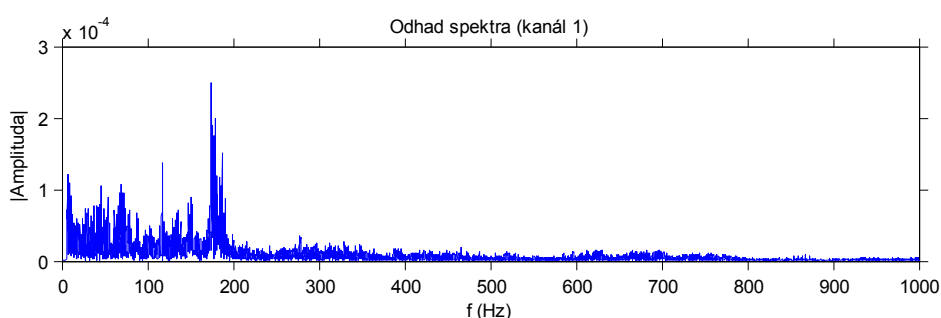
Časový průběh zvukového signálu, opět po filtraci frekvencí pod 6 Hz, je zobrazen na obr. 52.



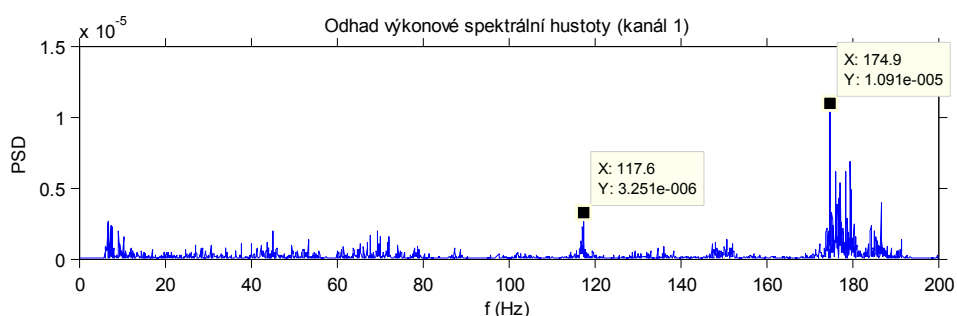
**Obr. 52** Audiozáznam *HudbaVzdalena.wav* (filtrovány frekvence pod 6 Hz) po přiblížení na rozsah -0.3 až 0.3.

Nejdominantnější zvuk, jak bylo uvedeno, je zvuk pocházející z bicích nástrojů. Bicí nástroje jsou obvykle sestaveny do bicí soupravy, která může obsahovat několik těchto nástrojů. Zpravidla se jedná o basový buben (angl. *Kick Drum*, 50 až 150 Hz), malý buben (tzv. virbl, angl. *Snare*, 120 až 250 Hz), přechody (angl. *Toms*, 100 až 600 Hz), tzv. kotel (angl. *Floor Tom*, 40 až 110 Hz) a činely (angl. *Cymbals*, 300 Hz až 20 kHz). Všechny tyto komponenty vytvářejí zvuky složené z mnoha různých frekvencí, obvykle soustředěných kolem základní frekvence. Obvyklý rozsah frekvencí, na které jsou bicí nástroje laděny, je uváděn v závorkách u jednotlivých nástrojů. Je však potřeba zmínit, že ladění bicích nástrojů nemá žádná pevně stanovená pravidla. Rozsah základních frekvencí zvuku u typické laděné elektrické kytary se nejběžněji pohybuje mezi 80 až 1200 Hz nebo výše. [70], [71], [72]

Odhad amplitudového spektra zvukového záznamu je zobrazen na obr. 53. Opět se výrazné frekvence nacházejí v nízkofrekvenční oblasti spektra pod 200 Hz. Pro lepší rozeznatelnost jednotlivých frekvencí je zobrazen ještě odhad spektra s *PSD* pouze do 200 Hz (obr. 54).



**Obr. 53** Odhad amplitudového spektra záznamu *HudbaVzdalena.wav*.



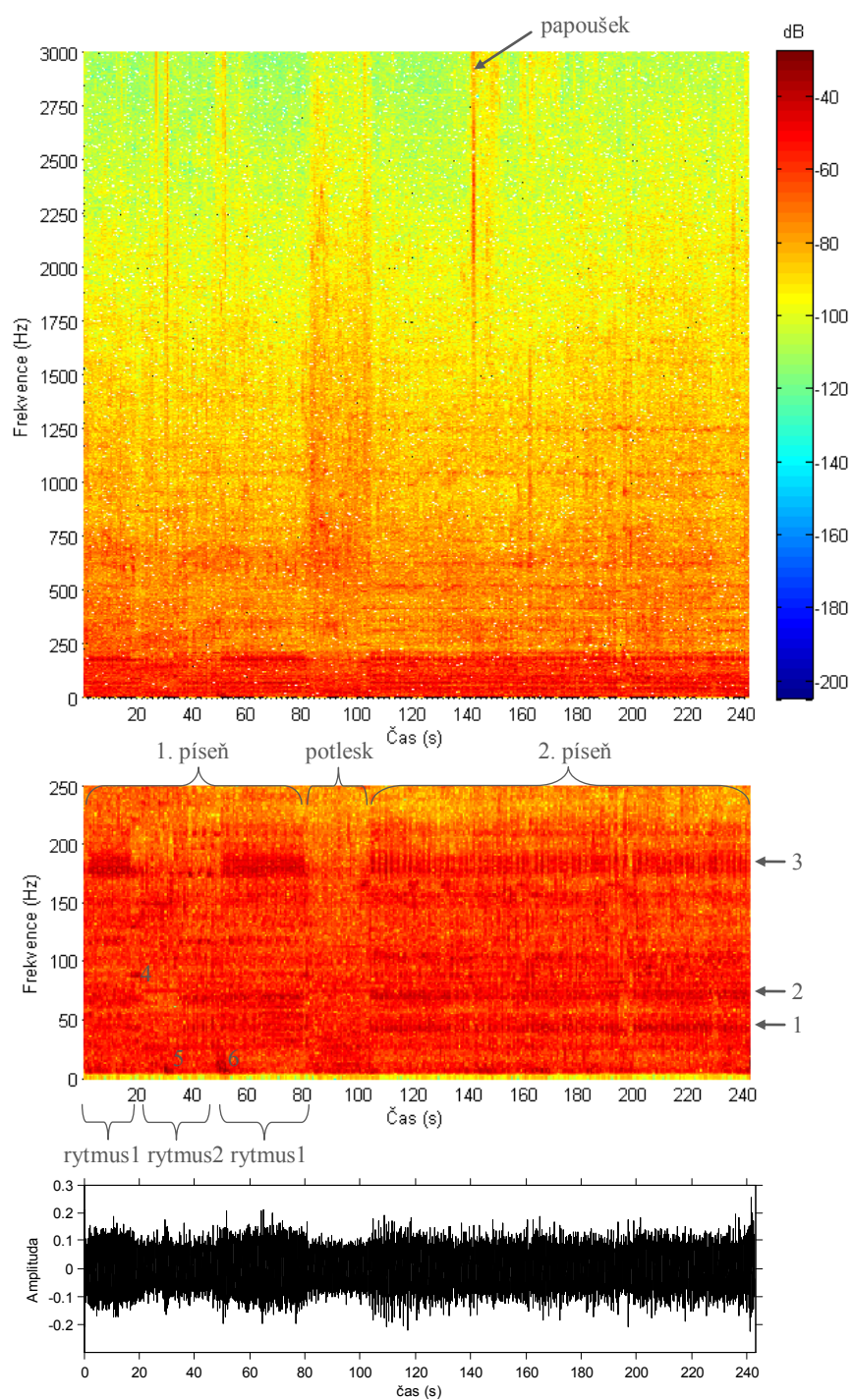
**Obr. 54** Odhad *PSD* spektra záznamu *HudbaVzdalena.wav* v rozsahu 0 až 200 Hz.

V důsledku existence velkého množství šumu je obtížné identifikovat základní frekvence hudebních nástrojů. Nicméně lze nalézt v odpovídající oblasti spektra některé výrazné frekvence, přičemž nejdominantnější je frekvence o hodnotě cca 175 Hz. Frekvenční složky zvuku menší než 60 Hz zde představují především šum. V případě, že by byl záznam pořízen přímo u zdroje zvuku, čímž by byly žádoucí zvuky silnější a šumové pozadí naopak více potlačeno, více by vynikly izolované složky spektra a bylo by možné lépe rozpoznat frekvence nástrojů.

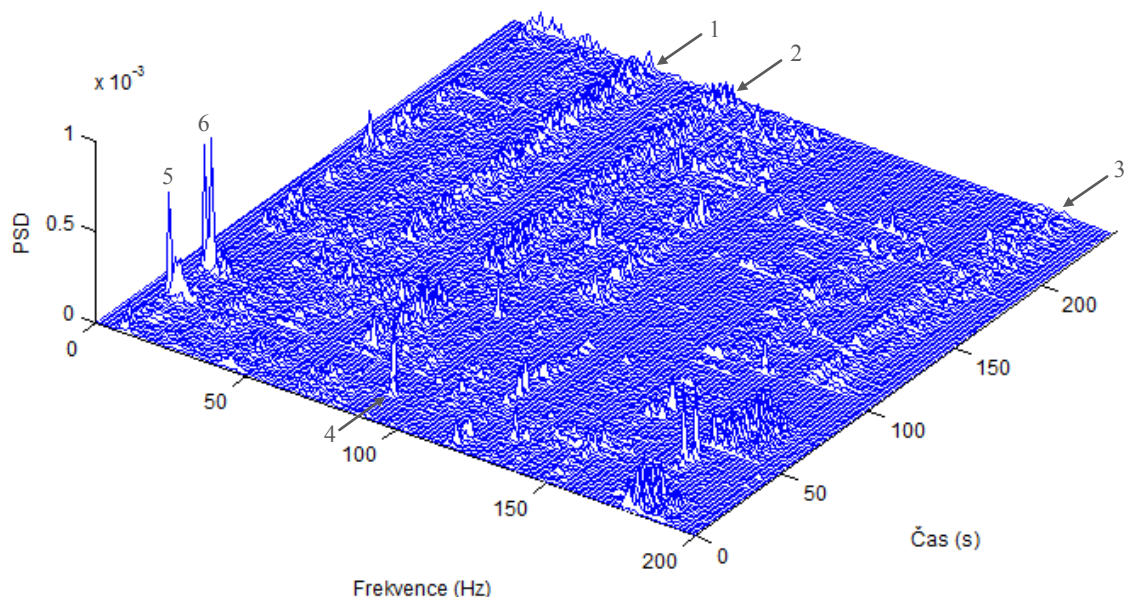
Spektrogram záznamu na obr. 55 je doplněn o informace týkající se zvuků obsažených v této nahrávce. Převládající zvuky v záznamu jsou z frekvenčního hlediska soustředěny do oblasti nízkých frekvencí přibližně do 200 Hz. Některé frekvenční oblasti s nejvýraznějšími frekvencemi



jsou ve spektrogramu označeny čísla 1 až 6. Stejné značení je pro lepší orientaci použito i u 3D spektrogramu na obr. 56.

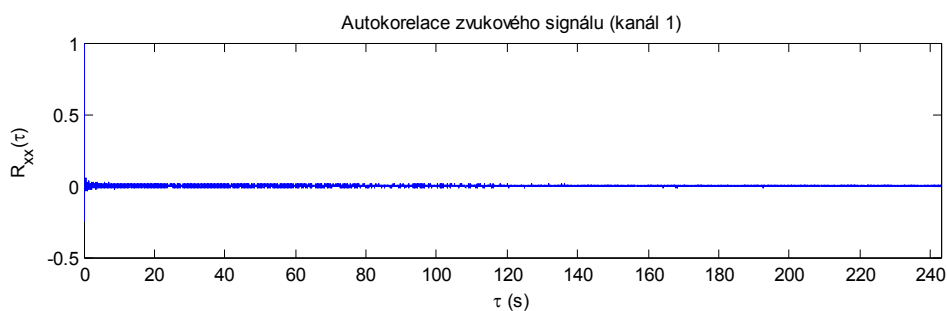


**Obr. 55** *Nahoře:* Spektrogram zvukového záznamu 0 až 3000 Hz. *Uprostřed:* Detail spektrogramu 0 až 250 Hz. *Dole:* Časový průběh zvukového signálu *HudbaVzdalena.wav*.



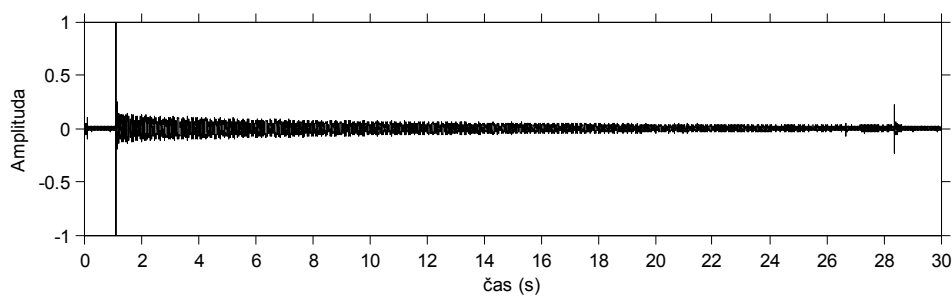
**Obr. 56** Spektrogram záznamu *HudbaVzdalena.wav* v 3D zobrazení (rozsah frekvencí 0 až 200 Hz).

Na základě provedené autokorelace tohoto zvukového záznamu (obr. 57) lze konstatovat, že není detekována periodicitita. To může být způsobeno tím, že se v záznamu opravdu nevyskytuje pravidelně se opakující část signálu nebo také tím, že je zde velké množství šumu.



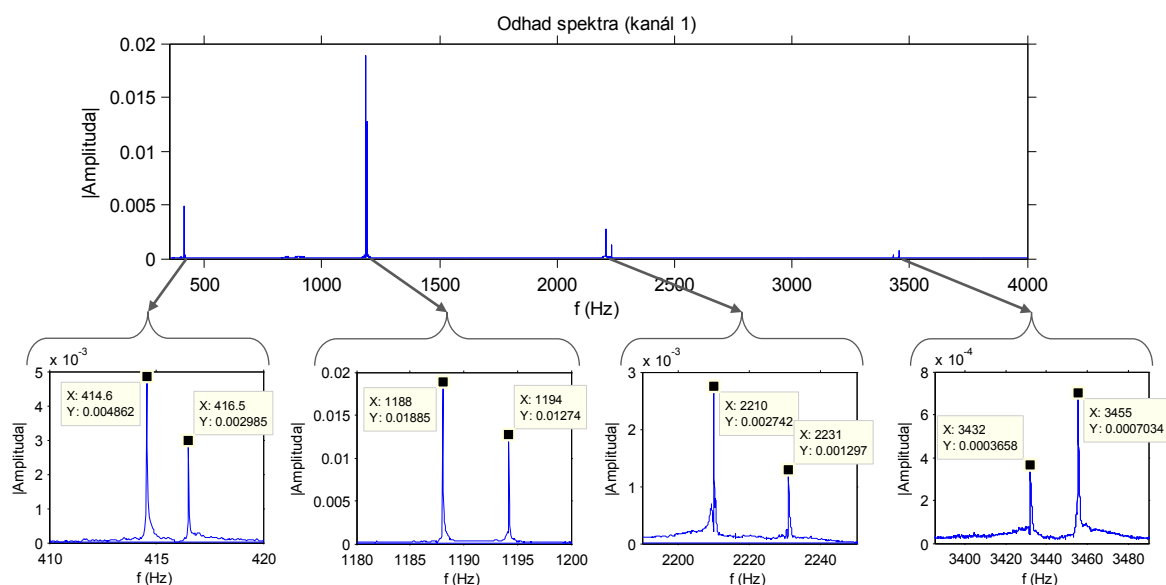
**Obr. 57** Autokorelační funkce zvukové nahrávky *HudbaVzdalena.wav*.

Na poslední analyzované audionahrávce pojmenované jako *TibetMisa.wav* (obr. 58) je zaznamenán zvuk generovaný po úderu do ozvučného nástroje, nazývaného tibetská nebo také zpívající mísa, (angl. *Tibetan Singing Bowl*) umístěného ve vzdálenosti 1 m od měřicího mikrofону. Jedná se o tradiční nástroj pocházející z oblasti Nepálu a sloužící především k účelům meditace či jako hudební nástroj. Tibetské mísy jsou vyrobeny ze slitiny několika kovů a tvarovány litím, tepáním či vysoustružením do podoby mís různých velikostí. Po úderu paličkou do jejich konstrukce vznikají vibrace a je vydáván zvonivý zvuk, který je charakterizován základní frekvencí a dalšími vyššími frekvencemi. V podstatě jsou tyto mísy neladěné a každý produkovaný zvuk je jedinečný. Počet generovaných frekvencí a jejich hodnot je určen především velikostí, tvarem, použitým materiálem a tloušťkou stěn nástroje. Obecně platí, že menší a více tenkostěnné tibetské mísy vydávají zvuk s obsahem vyšších frekvencí, což je i v případě tohoto konkrétního nástroje. [67], [68], [69]



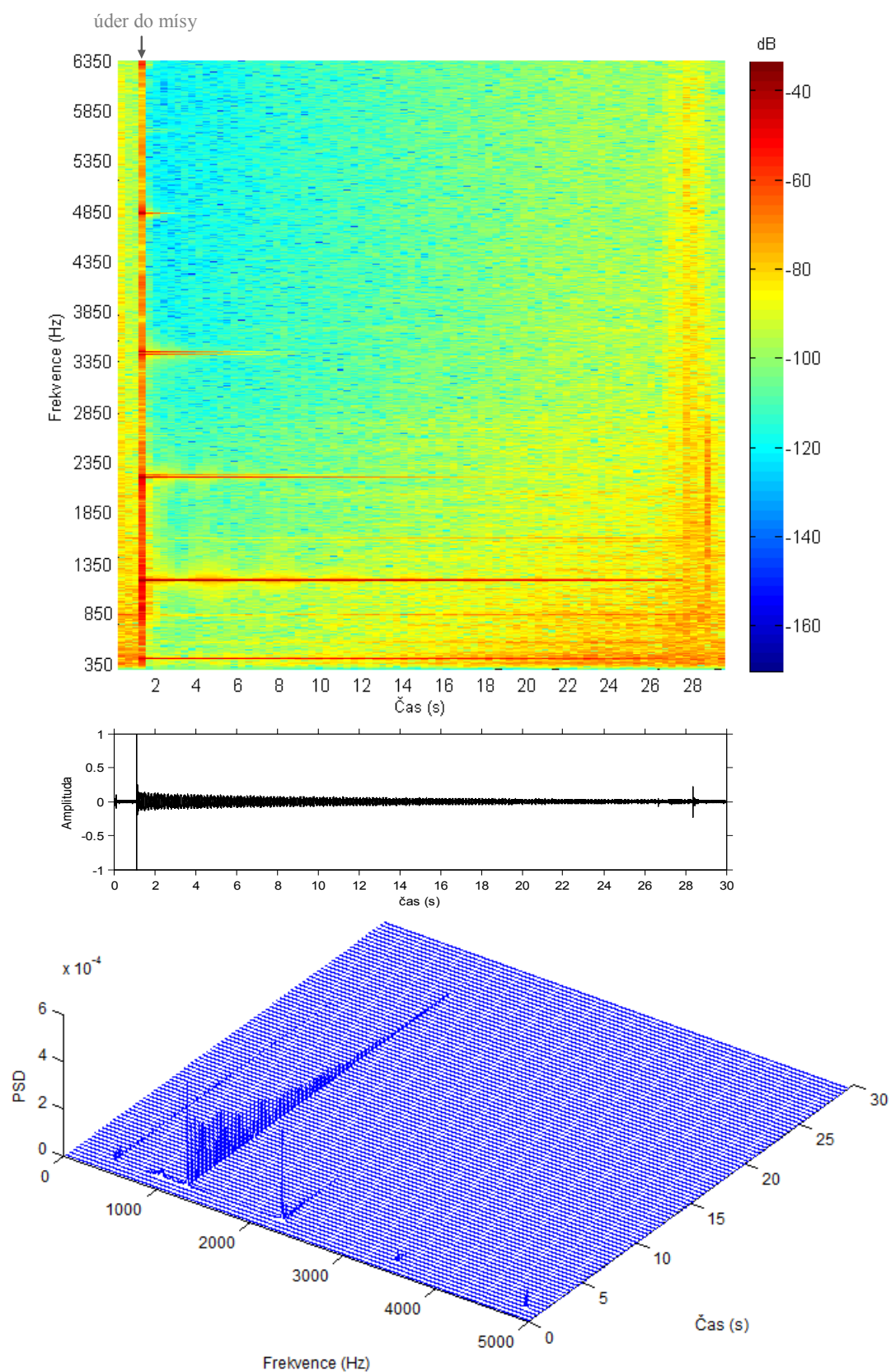
**Obr. 58** Audiozáznam *TibetMisa.wav* (filtrovány frekvence pod 350 Hz).

Na základě provedené spektrální analýzy původního záznamu byla zjištěna existence významných frekvenčních složek nad 400 Hz. Zvuk o nižších frekvencích v záznamu reprezentuje pouze šum. Z toho důvodu je provedena filtrace infrazvukových a nízkých frekvencí až do hodnoty 350 Hz. Výsledný odhad amplitudového spektra, resp. jeho úsek od 350 Hz do 4000 Hz, včetně detailního pohledu na obsažené frekvence je vykreslen na obr. 59. Jak je možné pozorovat na průběhu amplitudového spektra je zde několik významných frekvencí, které se v dané oblasti nevyskytují samostatně ale v páru a ve spektru jsou zobrazeny jako dvě poměrně blízká maxima. Nejvýraznější ze všech frekvenčních složek jsou frekvence o hodnotě cca 1188 Hz a 1194 Hz. V signálu se vyskytují také dvě nižší frekvence s hodnotami okolo 415 Hz a vyšší frekvence zejména v oblasti kolem 2200 Hz a 3400 Hz, které jsou podstatně tlumenější.



**Obr. 59** Odhad amplitudového spektra záznamu *TibetMisa.wav*. Dole: detailní pohled na obsažené frekvence.

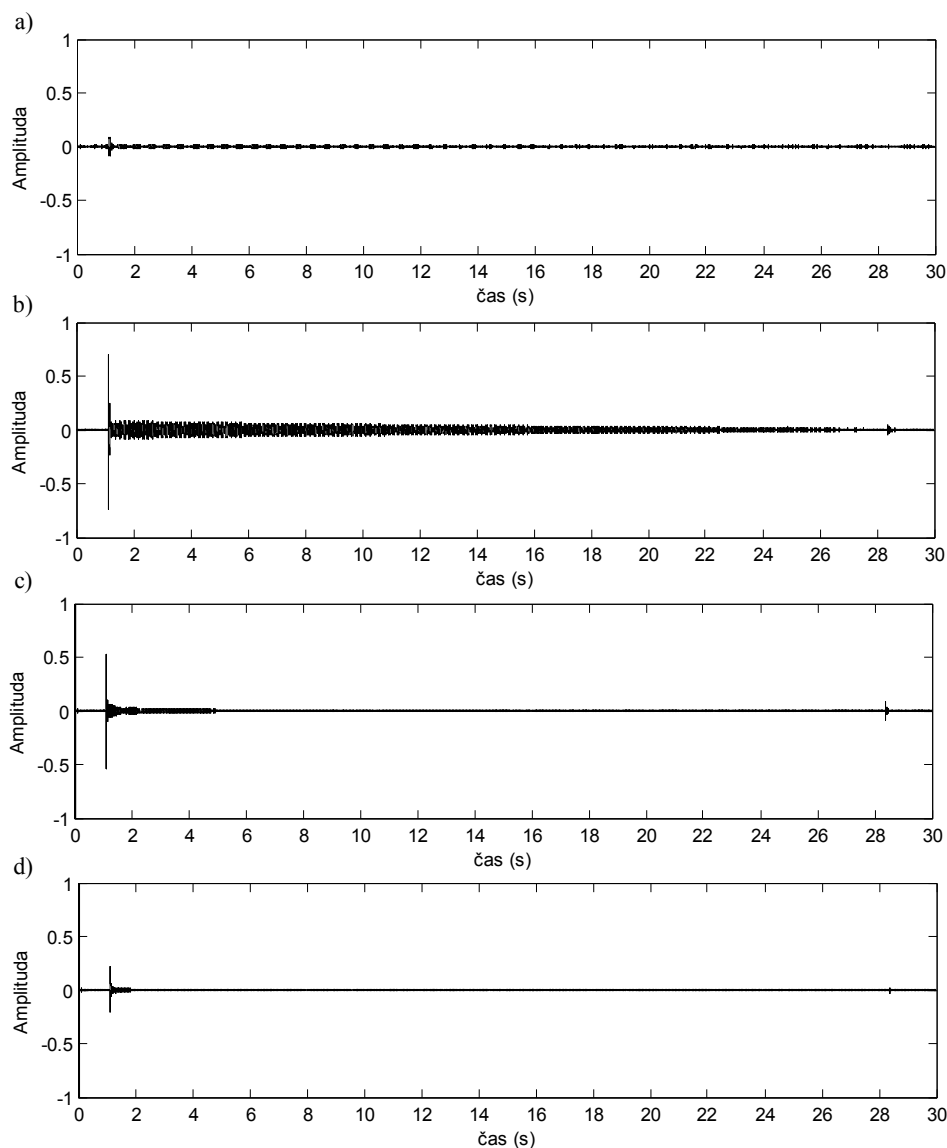
Rozložení amplitud zmiňovaných frekvencí, resp. výkonové spektrální hustoty v čase je zobrazeno na obr. 60. Na spektrogramu vykresleném na obr. 60 (nahore) lze pozorovat šum, který se stává s narůstajícím časem stále zřetelnějším. Největších hodnot dosahuje na začátku nahrávky (před úderem do tibetské mísy) a na jejím konci (po zeslabení vygenerovaného zvuku).



**Obr. 60** Nahoře: spektrogram zvukového záznamu 350 až 6350 Hz. Uprostřed: časový průběh signálu *TibetMisa.wav*. Dole: spektrogram záznamu v 3D zobrazení (rozsah frekvencí 0 až 5000 Hz).

Na následujícím obr. 61 je zobrazen signál, který je výsledkem filtrace původního zvukového záznamu pásmovou propustí s různě nastaveným propustným pásmem. Pro možnost vzájemného srovnání amplitud jednotlivých signálů po filtraci jsou všechny tyto signály zobrazeny ve standardním rozsahu -1 až 1.

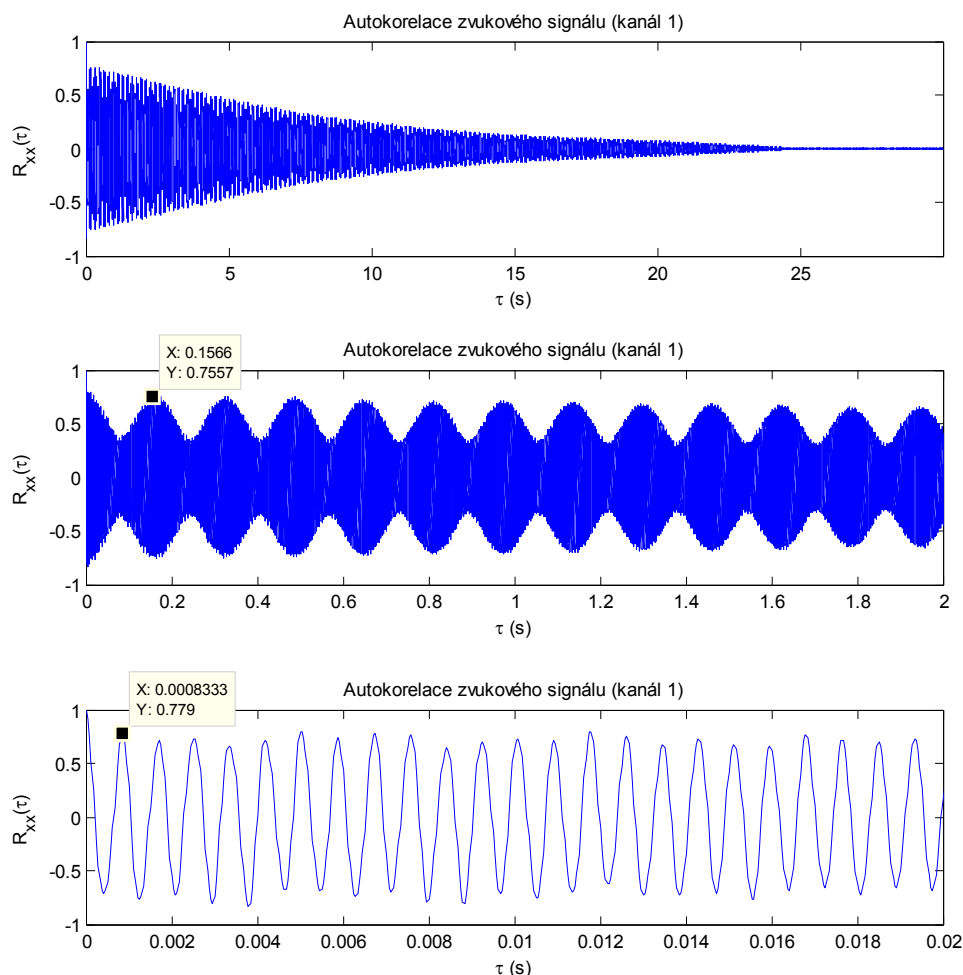
Při reprodukci filtrovaného signálu s označením a) bylo možné slyšet tlumený pulsující zvuk, tzv. zázněje. Ostatní filtrované signály již měly při poslechu jasnější zvuk s málo se projevujícími pulsacemi.



**Obr. 61** Filtrovaný záznam *TibetMisa.wav* s nastavením propustného pásma a) 300 až 500 Hz, b) 900 až 1500 Hz, c) 2000 až 2500 Hz, d) 3200 až 3700 Hz.

Pro nalezení případného výskytu periodičnosti v signálu na obr. 58 je provedena jeho autokorelace. Na základě výsledků autokorelace zobrazených v podobě autokorelační funkce na obr. 62 lze potvrdit výskyt opakujícího se úseku záznamu s periodami cca 0,17 s a 0,00083 s. První perioda

odpovídá opakujícím se pulsacím v důsledku vibrací a druhá perioda patří nejvýraznějšímu zvuku v signálu s frekvencí okolo 1200 Hz.



**Obr. 62** Autokorelační funkce audiozáznamu (nahore) a její přiblížení (uprostřed a dole).

Vyjma poslední analyzované nahrávky, na které je zachycen zvuk generovaný Tibetskou mísou, mají zvukové signály na záznamech z hlediska frekvenčního obsahu významné nízkofrekvenční složky, částečně pak také frekvenční složky odpovídající infrazvukům. Oba tyto druhy zvuků jsou kvůli svým vlastnostem považovány za nepříjemné či dokonce škodlivé, zejména pokud se vyskytují v dostatečně vysokých hladinách akustického tlaku. Nízkofrekvenční zvuky či infrazvuky však nepoškozují lidský organismus přímo, ale pouze zprostředkovaně tím, že způsobují např. špatnou kvalitu spánku, z čehož plynou další možné zdravotní obtíže. Jelikož se lépe šíří prostředím a jsou jím méně tlumeny než vysoké frekvence, mohou se dostat do velké vzdálenosti a ovlivňovat tak osoby, které již k danému zvuku nemají žádný vztah, např. nejsou přímo návštěvníky hudebního rockového koncertu nebo aktuálními účastníky silničního provozu. Právě zmiňované zdroje nízkofrekvenčního zvuku mohou být častým předmětem stížností osob na nadměrný a obtěžující hluk.

Záznamy jsou uloženy ve formátu, který neposkytuje reálné hodnoty akustického tlaku, jaký byl přítomen v místě měření. S ohledem na tuto skutečnost není možné provést posouzení škodlivosti

přítomných zvuků na lidský organismus z hlediska jejich intenzity, resp. hladiny akustického tlaku v dB. Jelikož se navíc jedná o pouhé krátké časové záznamy zvuků a není známa skutečná délka jejich působení, nelze posoudit jejich škodlivost ani s přihlédnutím k celkové expoziční době. Z charakteru nahrávek a jejich popisu lze však usuzovat na krátkodobou expozici zvuků. Z frekvenčního hlediska se jedná o zvuky, které by při postačujících hladinách a déle trvající expozici mohly působit rušivě či škodlivě.

U záznamu *CisticiVuz.wav* zachycujícího zvuk čistícího vozu jsou dominantní frekvence kolem 10 Hz a 35 Hz. První uváděná frekvenční oblast ještě spadá do infrazvuků, druhá již do nízkofrekvenční oblasti. Expozice těchto zvuků mohou u člověka vyvolat poruchy koncentrace, poruchy spánku, pocit podrážděnosti nebo psychické únavy. U analyzovaného záznamu s názvem *Drums* je akustická energie soustředěna do nízkofrekvenční oblasti přibližně mezi 30 až 80 Hz. Pokud by v reálu byla hudební produkce dostatečně silná, mohla by způsobit nepříjemné tělesné pocity v důsledku rezonance hrudní stěny či jiných tělesných částí. Stejně jako u předchozí nahrávky by se i zde mohly vyskytnout u exponovaných osob poruchy koncentrace, spánku nebo pocit rozmrzelosti. Nahrávka *HudbaTechno* je výsledkem záznamu reprodukce elektronické hudby ve stylu techno, přičemž v místě měření je zvukový signál složen z dominantních frekvencí okolo 75 Hz. Při použití výkonné zesilovací aparatury by během reprodukce uvedeného hudebního žánru taktéž mohlo dojít u osob vystavených této hudbě k rezonancím tělesných částí, zejména hrudníku. Na záznamu *HudbaVzdalena* je zachycen rockový koncert, který je jakožto zdroj zvuku vzdálen od místa měření. Proto jsou ve zvukovém signálu zachovány zejména nízké frekvence, typické pro dané hudební nástroje. Výrazné frekvence se ve spektru nacházejí v oblasti od 170 do 190 Hz a při dostatečně silné hudební produkci by generované zvuky mohly působit opět nepříjemné pocity.



## 7 Závěr

Hlavním cílem této práce bylo vytvořit grafické uživatelské rozhraní (GUI) v programovém prostředí Matlab pro analýzu zvukových signálů, resp. jejich audiozáznamů. Součástí tohoto cíle bylo rovněž následné zpracování těchto záznamů a vyhodnocení zjištěných výsledků s ohledem na možný vliv zkoumaných zvuků na lidský organismus.

Národní referenční laboratoř pro komunální hluk se sídlem v Ústí nad Orlicí poskytla pro realizaci analýzy pět audionahrávek. Jedná se o reálné záznamy zvuků uložených v audio formátu Wave, které pocházejí z měření provedených zvukoměrem.

U zvukových signálů je důležitý zejména jejich frekvenční obsah, který patří mezi základní zjišťované informace. Proto byla jako jedna z metod zvolena spektrální analýza prostřednictvím rychlé Fourierovy transformace (*FFT*), která je v současnosti běžně používaným nástrojem v oblasti analýzy signálů. Na základě odhadů amplitudových spekter a výkonové spektrální hustoty byl u čtyř z pěti audiosignálů prokázán výskyt infrazvukových a zejména nízkofrekvenčních zvuků. Nicméně kvůli výskytu poměrně velké úrovně šumu byla v některých případech obtížná přesnější identifikace frekvenčních složek. Další naprogramovaná metoda, tzv. třetinooktávová analýza, je rovněž určena pro spektrální analýzu zvukových signálů. Kvůli nízkému frekvenčnímu rozlišení však tato metoda není vhodná pro detailní frekvenční rozbor. Proto je zde uvedena spíše pro orientační přehled rozložení energií signálu v daných frekvenčních pásmech. Obdobně cepstrální metoda, která je vhodná spíše pro kratší periodické či kvaziperiodické signály (např. zvukový signál pocházející ze strojních vibrací nebo řečový signál) je naprogramována pro případ, že by měl uživatel programu uvedený typ zvukového signálu k dispozici. Pro zjištění výskytu periodicity v signálu byla zvolena metoda autokorelace. Na základě vyhodnocení průběhu autokorelační funkce byla detekována periodicitu pouze u čtyř signálů. U pátého signálu (*HudbaVzdalena.wav*) se opakující se úsek patrně nevyskytuje nebo autokorelace mohla být neúčinná kvůli výraznému šumovému pozadí. Pro sledování vývoje frekvencí v čase je využita a naprogramována metoda spektrogramu v 3D a 2D zobrazení.

Pokud se jedná o výsledné vyhodnocení působení analyzovaných nízkofrekvenčních zvuků na organismus člověka, není jeho realizace z důvodu absence požadovaných dat možná. Jedná se totiž o zvukové signály převedené do standardizovaného rozsahu -1 až 1, které neposkytují informace o reálných hodnotách akustického tlaku, jaký byl v místě měření. Bez znalosti originálních hodnot akustického tlaku nelze určit odpovídající hladiny akustického tlaku, na jejichž základě je realizováno hodnocení zvuků vzhledem k případným nežádoucím účinkům na exponovanou osobu. Z analyzovaných audionahrávek rovněž nelze zjistit skutečnou expoziční dobu, po kterou zvuky působily. Lze však konstatovat, že při dostatečně vysokých hladinách akustického tlaku a odpovídající délce expozice by nízkofrekvenční zvuky zachycené na nahrávkách mohly ovlivnit komfort osob, narušit jejich koncentraci či v případě večerního a nočního výskytu způsobit nekvalitní spánek. Při dlouhodobém působení by pak tyto nepříjemné a obtěžující zvuky mohly nepřímo vyvolat další zdravotní komplikace.

V rámci realizace této práce byly také prozkoumány možnosti využití programu Matlab, a ověřeno, že je vhodným prostředkem pro zpracování audiosignálů. Výsledky práce potvrzují, že Matlab je propracované programové prostředí, ve kterém lze najít mnoho funkcí užitečných také pro manipulaci se zvukovými signály. Velkou výhodou je zde možnost vytvoření vlastních funkcí,



čímž se oblast jeho použití značně rozšiřuje. Pro vytvoření grafického uživatelského rozhraní byly využity jak integrované funkce vývojového prostředí, tak také implementovány nové funkce, speciálně navržené pro zpracování daných signálů v GUI. S ohledem na to, že existuje široká škála různých zvuků, které se liší nejen svými vlastnostmi, tj. časovými průběhy, délkou trvání, frekvenčním obsahem, charakterem vzniku atd., ale také odlišným způsobem jejich rozboru a hodnocení, je obtížné vytvořit univerzální program, který by zahrnoval veškeré potřebné funkce a operace potřebné pro zpracování libovolných zvukových signálů. Z toho důvodu byly zvoleny a naprogramovány především metody, které lze aplikovat na všech pěti zadáných audiozáznamech. Jisté omezení pro práci s programem představovala poměrně vysoká vzorkovací frekvence záznamů a také jejich relativně dlouhá délka, z čehož plyne velký počet vzorků, a tedy i zpracovávaných dat. S ohledem na tuto skutečnost a na hardwarovou výbavu použitých PC trvaly některé výpočty a grafická zobrazení poměrně dlouhou dobu. Při vykreslování 3D spektrogramu v celém frekvenčním rozsahu program dokonce přestal pracovat a pro dokončení operací bylo nutno zmenšit frekvenční rozsah zobrazovaného grafu.

V současnosti nejsou dostupné vhodné standardizované metody pro měření či analýzu infrazvuků a nízkofrekvenčních zvuků, v důsledku čehož je jejich rozbor a hodnocení složitější. Nicméně je v dnešní době prováděno velké množství výzkumů zaměřených na tuto problematiku, a tak snad lze v budoucnu očekávat jejich zavedení do praxe.

Na závěr lze uvést zmínku také o psychoakustických metrikách. Psychoakustika, jakožto zajímavý vědní podobor akustiky se zabývá vnímáním zvuků mozkiem. Její poznatky jsou využívány zejména v průmyslu při posuzování kvality zvuků generovaných výrobními produkty, přičemž odrážejí kvalitu samotného výrobku. V případě, že by byla k dispozici přímo data, která by reprezentovala skutečné naměřené hodnoty akustického tlaku, bylo by možné získat tyto psychoakustické metriky jako je např. ostrost, drsnost, kolísavost aj.

## 8 Seznam použité literatury

- [1] BACHMAN, George, Lawrence NARICI a Edward BECKENSTEIN. *Fourier and wavelet analysis*. New York: Springer, c2000, ix, 505 p. ISBN 03-879-8899-8.
- [2] SMETANA, Ctirad. *Hluk a vibrace. Měření a hodnocení*. 1. vyd. Praha: Sdělovací technika, 1998, 188 s. ISBN 80-901-9362-5.
- [3] NOVÝ, Richard. *Hluk a chvění*. 2. vyd. Praha: ČVUT, 1995, 389 s. ISBN 80-010-2246-3.
- [4] SMITH, David M. *Engineering Computation with MATLAB*. 3. ed. Sted: Pearson Education. ISBN 978-027-3769-132.
- [5] BROCH, J. *Mechanical Vibration and Shock Measurements*. Naerum: Brüel, 1984, 370 s.
- [6] ELLIOTT, P. A. Nelson and S. J. *Active control of sound*. 3. printing. London [u.a.]: Acad. Press, 1995. ISBN 01-251-5426-7.
- [7] CHAPRA, Steven C. *Applied numerical methods with MATLAB for engineers and scientists*. 3. ed., internat. ed. New York, NY: McGraw-Hill. ISBN 978-007-1086-189.
- [8] ZAPLATÍLEK, Karel a Bohuslav DOŇAR. *MATLAB: začínáme se signály*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 271 s. ISBN 80-730-0200-0.
- [9] KLECZKOWSKI, Piotr. *Rozprawy monografie 109: Właściwości słuchu w analizie sygnałów akustycznych*. Kraków: UWND AGH, 2002. ISSN 0867-6631.
- [10] PLCHOT, Oldřich. *Vzorkování, aliasing a antialiasing*. In: Faculty of Information Technology of Brno University of Technology [online]. Brno, 2013/2014 [cit. 2014-01-18]. Dostupné z: [http://www.fit.vutbr.cz/study/courses/ISS/public/labs/6\\_vzork/6\\_vzork.pdf](http://www.fit.vutbr.cz/study/courses/ISS/public/labs/6_vzork/6_vzork.pdf)
- [11] *Computer Solution of Engineering Problems: Matlab Sound*. In: The University of Tennessee [online]. 2012 [cit. 2014-01-18]. Dostupné z: <http://ef.engr.utk.edu/ef230-2012-08/modules/matlab-sound/>
- [12] HORČÍK, Zdeněk. *Snímání biologických signálů*. In: ČVUT [online]. [cit. 2014-01-18]. Dostupné z: [https://cw.felk.cvut.cz/wiki/\\_media/courses/a6m31let/04\\_digitalizace.pdf](https://cw.felk.cvut.cz/wiki/_media/courses/a6m31let/04_digitalizace.pdf)
- [13] *Záznam a zpracování zvuku*. In: Mediální škola [online]. [cit. 2014-01-18]. Dostupné z: <http://medialniskola.cz/files/mes-b-2/audio.pdf>
- [14] *Digitální zpracování signálů: Fourierova transformace, FFT Frekvenční analýza*. In: [online]. [cit. 2014-01-18]. Dostupné z: [http://www.337.vsb.cz/materialy/zaklady\\_experimentalni\\_mechaniky/EXPME\\_3.pdf](http://www.337.vsb.cz/materialy/zaklady_experimentalni_mechaniky/EXPME_3.pdf)
- [15] KOZUBEK, Tomáš, Tomáš BRZOBOHATÝ, Marta JAROŠOVÁ a Václav HAPLA. *Lineární algebra s matlabem* [online]. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava a Západo-česká univerzita v Plzni, 2012 [cit. 2014-01-18]. Dostupné z: [http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/linearni\\_algebra\\_s\\_matlabem.pdf](http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/linearni_algebra_s_matlabem.pdf)
- [16] HERINGOVÁ, Blanka a Petr HORA. *Matlab, Díl 1. Práce s programem*. In: Plzeň [online]. 1995 [cit. 2015-01-05]. Dostupné z: <http://www.cdm.cas.cz/czech/hora/vyuka/mvs/tutorial.pdf>
- [17] CHALOUPKA, Vladimír. *PHYS 536: Introduction to Acoustics and Digital Signal Processing*. In: University of Washington [online]. 2011 [cit. 2014-01-18]. Dostupné z: <http://www.phys.washington.edu/users/vladi/acousticsDSP/536handout2011.pdf>
- [18] TOOLE, Floyd E. *Sound reproduction: the acoustics and psychoacoustics of loudspeakers and rooms*. 1st ed. Amsterdam, 2008, xix, 550 s. ISBN 978-0-240-52009-4.

- [19] ROSSING, Thomas D. Springer handbook of acoustics. New York, N.Y.: Springer, c2007, xxiv, 1182 p. ISBN 03-873-3633-8.
- [20] EVEREST, F. The master handbook of acoustics. 2001, č. 4, DOI: 0071399747.
- [21] JAKSCH, Ivan. Technická diagnostika: Základy akustiky a hlukové diagnostiky. In: Technická univerzita v Liberci, Ústavu řízení systémů a spolehlivosti (RSS): Fakulty mechatroniky, informatiky a mezipředmětových studií [online]. 2010 [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: [http://www.rss.tul.cz/download/tdg/P7\\_hluk\\_ESF.pdf](http://www.rss.tul.cz/download/tdg/P7_hluk_ESF.pdf)
- [22] MCLOUGHLIN, Ian. Applied speech and audio processing. 1st pub. Cambridge: Cambridge University Press, 2009, x, 206 s. ISBN 978-0-521-51954-0.
- [23] MARSHALL, David. Basic Digital Audio Signal Processing. In: Cardiff School of Computer Science & Informatics [online]. 2010 [cit. 2014-01-18]. Dostupné z: [http://www.cs.cf.ac.uk/Dave/CM0268/PDF/07\\_CM0268\\_DSP.pdf](http://www.cs.cf.ac.uk/Dave/CM0268/PDF/07_CM0268_DSP.pdf)
- [24] SEDLÁČEK, Radek. Aplikace vestavěných systémů Přednáška č. 6: Základní metody číslicového zpracování signálu a obrazu - část 1. In: ČVUT v Praze: Katedra měření [online]. 2012 [cit. 2014-01-18]. Dostupné z: [http://measure.feld.cvut.cz/system/files/files/cs/vyuka/predmety/A4M38AVS/DSP\\_AVS\\_PART\\_I\\_2012.pdf](http://measure.feld.cvut.cz/system/files/files/cs/vyuka/predmety/A4M38AVS/DSP_AVS_PART_I_2012.pdf)
- [25] SEDLÁČEK, Radek. Aplikace vestavěných systémů Přednáška č. 7: Základní metody číslicového zpracování signálu a obrazu - část 2. In: ČVUT v Praze: Katedra měření [online]. 2012 [cit. 2014-01-02]. Dostupné z: [http://measure.feld.cvut.cz/system/files/files/cs/vyuka/predmety/A4M38AVS/DSP\\_AVS\\_PART\\_II\\_2012.pdf](http://measure.feld.cvut.cz/system/files/files/cs/vyuka/predmety/A4M38AVS/DSP_AVS_PART_II_2012.pdf)
- [26] TŮMA, Jiří. Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT. Praha: Sdělovací technika, 1997, 174 s. ISBN 80-901-9361-7.
- [27] SEDLÁČEK, Miloš. 2002. Využití Matlabu pro potlačení prosakování energie ve spektru při DFT spektrální analýze interpolací v časové oblasti. *Digital Signal and Image Processing: Institute of Chemical Technology, Prague, Department of Computing and Control Engineering* [online]. České vysoké učení technické v Praze [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: [http://dsp.vscht.cz/konference\\_matlab/matlab02/sedlacek.pdf](http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/matlab02/sedlacek.pdf)
- [28] HOLČÍK, Jiří. Signály a lineární systémy. In: Masarykovy univerzita: Institut biostatistiky a analýz [online]. 2014 [cit. 2014-01-18]. Dostupné z: <http://www.iba.muni.cz/esf/res/file/bimat-prednasky/signaly-a-linearni-systemy/SLS-01.pdf>
- [29] Analýza a zpracování signálů. In: University of West Bohemia: Department of Computer Science and Engineering [online]. 2013/2014 [cit. 2014-01-18]. Dostupné z: [http://proteus.fav.zcu.cz/~mautner/Azs/Azs1\\_Uvod.pdf](http://proteus.fav.zcu.cz/~mautner/Azs/Azs1_Uvod.pdf)
- [30] ČSN ISO 7196: Akustika – Frekvenční váhová funkce pro měření infrazvuku. Praha: Český normalizační institut, 1996. 12 s.
- [31] NĚMEČEK, Pavel. Akustická diagnostika. In: KATEDRA VOZIDEL A MOTORŮ: Technická univerzita v Liberci [online]. Copyright © 2009-2012 [cit. 2015-03-01]. Dostupné z: <http://www.kvm.tul.cz/getFile/id:1848>
- [32] Elektroakustické měniče: Mikrofony. In: Encyklopedie fyziky [online]. Copyright © 2006 - 2015 [cit. 2015-03-01]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/377-mikrofony>

- [33] MIŠUNA, Vojtěch. Experimentální analýza hluku. In: Biomechanika 2: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství [online]. 2010 [cit. 2015-02-01]. Dostupné z:  
[http://biomechanika.fme.vutbr.cz/index.php?option=com\\_phocadownload&view=categor y&download=85%3Aexperimentalni-analyza-hluku&id=4%3Afrvs\\_stodola&Itemid=96&lang=cs](http://biomechanika.fme.vutbr.cz/index.php?option=com_phocadownload&view=categor y&download=85%3Aexperimentalni-analyza-hluku&id=4%3Afrvs_stodola&Itemid=96&lang=cs)
- [34] GRAS - Sound and vibration. [online]. 2011 [cit. 2011-03-02]. Dostupné z:  
[http://www.sagetechnologies.com/attachments/article/15/GRAS\\_Selection\\_Guide\\_Mics\\_Preamps\\_July\\_2011.pdf](http://www.sagetechnologies.com/attachments/article/15/GRAS_Selection_Guide_Mics_Preamps_July_2011.pdf)
- [35] ŽIARAN, Stanislav. *Kmitanie a akustika. Ochrana človeka pred kmitaním a hlukom*. 1. vydání. Bratislava: STU, 2001, 254 s. ISBN 80-227-1607-3.
- [36] HOWARD, David M., ANGUS, Jamie. *Acoustics and Psychoacoustics*. 4st ed. Oxford: Focal Press, 2009, 488 s. ISBN 978-0-240-52175-6.
- [37] FASTL, H., ZWICKER, E. *Psychoacoustics – Facts and Models*. 3rt ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007, 463 s. ISBN 978-3-540-68888-4.
- [38] GUŽAS, D. a R. VIRŠILAS. Infrasound hazards for the environment and the ways of protection. *Ultragarsas / Kauno Technologijos universitetas* [online]. 2009, roč. 64, č. 3 [cit. 2015-01-20]. ISSN 1392-2114. Dostupné z:  
[http://www.ktu.lt/ultra/journal/pdf\\_64\\_3/Vol.64-No.3-2009\\_06-Guzas.pdf](http://www.ktu.lt/ultra/journal/pdf_64_3/Vol.64-No.3-2009_06-Guzas.pdf)
- [39] Elektřina a magnetismus: Základní vlastnosti mikrofonů. In: REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Encyklopedie fyziky* [online]. © 2006 - 2015 [cit. 2015-03-15]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main/article/view/378-zakladni-vlastnosti-mikrofonu>
- [40] Technical Documentation: Microphone Handbook For the Falcon™ Range of Microphone Products. In: *Brüel & Kjaer* [online]. 1995 [cit. 2015-03-15]. Dostupné z: <http://www.bksv.com/doc/ba5105.pdf>
- [41] Elektroakustická zařízení: výběr z učebních textů. In: *Střední škola informatiky, elektrotechniky a řemesel: Rožnov pod Radhoštěm* [online]. [cit. 2015-03-15]. Dostupné z: <http://www.roznovskastredni.cz/~fuchs/download/Akustika.pdf>
- [42] ZÁSTĚRA, Jan. Směrové a frekvenční charakteristiky mikrofonů. In: *Janz Audio: Profesionální zvuková technika* [online]. 2006 [cit. 2015-03-15]. Dostupné z: <http://www.janzaudio.com/clanky/smerove-a-frekvencni-charakteristiky-mikrofonu.html>
- [43] KRAVAŘÍK, Jindřich. Stopařův průvodce digitálním zvukem - 2. díl: Vzorkovací frekvence. In: *ATLANTIDA spol. s r.o.: Server o tvorbě hudby a zpracování zvuku* [online]. © 2009 - 2015 [cit. 2015-03-15]. Dostupné z: <http://www.audiozone.cz/recenze/stoparuv-pruvodce-digitalnim-zvukem-2-dil-t18556.html>
- [44] Časově frekvenční analýza signálů. In: *Fakulty mechatroniky, informatiky a mezioborových studií* [online]. 2011 [cit. 2015-03-15]. Dostupné z: [http://www.rss.tul.cz/download/tdg/P6\\_cas\\_freq\\_analyza.pdf](http://www.rss.tul.cz/download/tdg/P6_cas_freq_analyza.pdf)

- [45] OUIS, D. ANNOYANCE FROM ROAD TRAFFIC NOISE: A REVIEW. *Journal of Environmental Psychology* [online]. 2001, vol. 21, issue 1, s. 101-120 [cit. 2015-03-15]. DOI: 10.1006/jevp.2000.0187. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272494400901877>
- [46] MORE, Shashikant R. *Aircraft Noise Characteristics and Metrics* [online]. Indiana, 2010 [cit. 2015-03-15]. Dostupné z: <http://web.mit.edu/aeroastro/partner/reports/proj24/noisethesis.pdf>. Doctoral thesis. Purdue University.
- [47] Wide range measurement from 1 to 20 000 Hz: Sound level meter Class 1, NL 62. In: *ANV Measurement Systems* [online]. © 2010 [cit. 2015-03-15]. Dostupné z: [http://www.noise-and-vibration.co.uk/files/pdfs/NL-62\\_Datasheet\\_1112-2.pdf](http://www.noise-and-vibration.co.uk/files/pdfs/NL-62_Datasheet_1112-2.pdf)
- [48] ČSN EN 61672-1. *Elektroakustika - Zvukoměry: Část 1: Technické požadavky*. ed. 2. Praha: Český normalizační institut, 2014.
- [49] KINNERUP, Rasmus Trock. *Ultra Low Frequency Infrasonic Measurement System* [online]. Lyngby, 2011 [cit. 2015-03-15]. Dostupné z: [http://etd.dtu.dk/thesis/285801/prod11318503444852\\_Rapport\\_til\\_upload\\_1.pdf](http://etd.dtu.dk/thesis/285801/prod11318503444852_Rapport_til_upload_1.pdf). Master's Thesis. Technical University of Denmark.
- [50] Konstrukce miktofonů. In: *Elektroakustika* [online]. [cit. 2015-03-15]. Dostupné z: [http://www.elektroakustika.cz/types\\_microphones.html](http://www.elektroakustika.cz/types_microphones.html)
- [51] ZÁSTĚRA, Jan. Principy a typy mikrofonních systémů. In: *Janz Audio: Profesionální zvuková technik* [online]. 2006 [cit. 2015-03-15]. Dostupné z: <http://www.janzaudio.com/clanky/principy-a-typy-mikrofonnich-systemu.html>
- [52] Measurement microphones. In: *Brüel & Kjaer* [online]. 1994 [cit. 2015-03-15]. Dostupné z: <http://www.bksv.com/doc/br0567.pdf>
- [53] Microphone handbook. In: *PCB Piezotronics* [online]. 2013 [cit. 2015-03-15]. Dostupné z: [http://www.pcb.com/Linked\\_Documents/Vibration/Microphone\\_Handbook.pdf](http://www.pcb.com/Linked_Documents/Vibration/Microphone_Handbook.pdf)
- [54] ORSÁG, Petr. *Měření základních charakteristik miktofonů* [online]. Brno, 2011 [cit. 2015-03-15]. Dostupné z: [http://www.google.cz/url?sa=t&ret=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CCoQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.vutbr.cz%2Fwww\\_base%2Fzav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php%3Ffile\\_id%3D49040&ei=W3\\_zVOBZEsitUZq-hNAF&usg=AFQjCNEf8R3XXtWVqjk1PA1Qa-LrdxwJRA&bvm=bv.87269000,d.d24](http://www.google.cz/url?sa=t&ret=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CCoQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.vutbr.cz%2Fwww_base%2Fzav_prace_soubor_verejne.php%3Ffile_id%3D49040&ei=W3_zVOBZEsitUZq-hNAF&usg=AFQjCNEf8R3XXtWVqjk1PA1Qa-LrdxwJRA&bvm=bv.87269000,d.d24). Bakalářská práce. Vysoké Učení Technické v Brně. Vedoucí práce Zdeněk Havránek
- [55] BURDA, Zdeněk. Mikrofony. In: *Zdeněk Burda* [online]. 1999 [cit. 2015-03-15]. Dostupné z: <http://www.zdenda.com/1999/01/mikrofony/>
- [56] RUMSEY, Francis a Tim MCCORMICK. *Sound and recording* [online]. 6th ed. Oxford: Focal Press, 2009 [cit. 2015-03-15]. ISBN 978-0-240-52163-3.
- [57] Measuring microphones. In: *Brüel & Kjaer* [online]. [cit. 2015-03-28]. Dostupné z: <http://www.vibrationdata.com/tutorials/Measuring%20Microphones%20-%20BA721615.pdf>

- [58] HOLČÍK, Jiří. Signály a lineární systémy. In: Masarykovy univerzita: Institut biostatistiky a analýz [online]. 2014 [cit. 2014-01-19]. Dostupné z: <http://www.iba.muni.cz/esf/res/file/bimat-prednasky/signaly-a-linearni-systemy/SLS-02.pdf>
- [59] Miláček, Stanislav. *Měření a vyhodnocování mechanických veličin*. 1. vydání. Praha: ČVUT, 2001, 231 s. ISBN 80-01-02417-2.
- [60] MONSPORTOVÁ, Lucie. *Zjišťování vlivu nízkofrekvenčního zvuku na lidský organismus*. Ostrava, 2012. Bakalářská práce. VŠB-TU Ostrava.
- [61] Infrasound and Ultrasound: Exposure and Protection. In: *Association of VA Audiologists: AVAA* [online]. ©2015 [cit. 2015-03-06]. Dostupné z: <http://myavaa.org/documents/conferences/AVAA-March-2010-Conference/PDF-Presentations/Cook%20Mon%201015%20Navy%20JDVAC%202010.pdf>
- [62] Nařízení vlády č. 272/2011 Sb., o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací, ve znění pozdějších předpisů.
- [63] Předpis č. 523/2006 Sb. *Sbírka zákonů ČR: Vyhláška o hlukovém mapování*. 2006.
- [64] Přílohy: Výsledky mapování, Výsledky mapování a závěry, Hlukové mapování a legislativa, Strategické hlukové mapy železnic. In: *Ministerstvo zdravotnictví České Republiky* [online]. 2002 [cit. 2015-04-07]. Dostupné z: [http://www.mzcr.cz/Verejne/obsah/ietapa\\_1670\\_5.html](http://www.mzcr.cz/Verejne/obsah/ietapa_1670_5.html)
- [65] SEDLÁČEK, Radek. Základní metody číslicového zpracování signálu a obrazu - část II. In: *Katedra měření: České vysoké učení technické v Praze - Fakulta elektrotechnická* [online]. 2012 [cit. 2015-04-01]. Dostupné z: [http://measure.feld.cvut.cz/system/files/files/cs/vyuka/predmety/A4M38AVS/DSP\\_AV\\_S\\_PART\\_II\\_2012.pdf](http://measure.feld.cvut.cz/system/files/files/cs/vyuka/predmety/A4M38AVS/DSP_AV_S_PART_II_2012.pdf)
- [66] Bartošek, J.: *Real-Time možnosti zkrácené autokorelační funkce pro detekci základní frekvence*, ČVUT, Praha. Humusoft [online]. © 1991 - 2015 [cit. 2015-03-29]. Dostupné z: [http://www2.humusoft.cz/www/papers/matlab12/013\\_Bartosek.pdf](http://www2.humusoft.cz/www/papers/matlab12/013_Bartosek.pdf)
- [67] Tibetská mísa. 2015. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Tibetsk%C3%A1\\_m%C3%ADsa](http://cs.wikipedia.org/wiki/Tibetsk%C3%A1_m%C3%ADsa)
- [68] SHAKTI, Naga. 2011. The Tuning of Tibetan Singing Bowls. *The Secret Lives of Singing Bowls: NagaShakti's Blog* [online]. [cit. 2015-04-08]. Dostupné z: <https://nagashakti.wordpress.com/2011/03/18/the-tuning-of-tibetan-singing-bowls/>
- [69] About our instruments: An introduction to singing bowls. 2011. *Elemental Resonance* [online]. [cit. 2015-04-08]. Dostupné z: <http://www.elemental-resonance.com/bowls.html>
- [70] Bicí souprava. 2015. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2015-04-09]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Bic%C3%AD\\_souprava](http://cs.wikipedia.org/wiki/Bic%C3%AD_souprava)
- [71] SUTTON, Christopher. 2014. Percussion Frequencies: Part 1 – Drums. *Easy ear training* [online]. [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: <http://www.easyeartraining.com/learn/percussion-frequencies-part-1-drums/>

- [72] Guitars. 2015. *Recordingology* [online]. [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: <http://recordingology.com/in-the-studio/guitars/>
- [73] MAŠKOVÁ, Martina a Marián VOJTEK. 2013. Zvuky vnímáme podle jejich frekvencí a svých zkušeností. Nejoblíbenější jsou potlesk, dětský smích a tekoucí voda. *Český rozhlas* [online]. [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: [http://www.rozhlas.cz/radio\\_cesko/exkluzivne/\\_zprava/zvuky-vnimame-podle-jejich-frekvenci-a-svych-zkusenosti-nejoblibenejsi-jsou-potlesk-detsky-smich-a-tekouci-voda--1133394](http://www.rozhlas.cz/radio_cesko/exkluzivne/_zprava/zvuky-vnimame-podle-jejich-frekvenci-a-svych-zkusenosti-nejoblibenejsi-jsou-potlesk-detsky-smich-a-tekouci-voda--1133394)
- [74] Základy fyziologické akustiky. 2008. *Techmania: Edutorium* [online]. [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: [http://www.techmania.cz/edutorium/art\\_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=416b757374696b61h&key=674](http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=416b757374696b61h&key=674)
- [75] KONSTANTIN-HANSEN, Hans. 2015. Envelope Analysis for Diagnostics of Local Faults in Rolling Element Bearings. *Brüel & Kjær: Beyond measure* [online]. [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: <http://www.bksv.com/doc/bo0501.pdf>
- [76] SCHUST, M. Effects of low frequency noise up to 100 Hz. *Noise and Health* [online]. 2004, roč. 6, č. 23 [cit. 2014-03-04]. Dostupné z: <http://www.noiseandhealth.org/article.asp?issn=1463-1741;year=2004;volume=6;issue=23;spage=73;epage=85;aulast=Schust>

## 9 Seznam příloh

Příloha I Kmitočtové váhové funkce A, C, Z (ČSN EN 61672-1 ed. 2) a G (ČSN ISO 7196).

Příloha II Příklady mikrofónů pro měření infrazvuků a nízkofrekvenčních zvuků.

Příloha III Časové průběhy reálných zvukových záznamu.

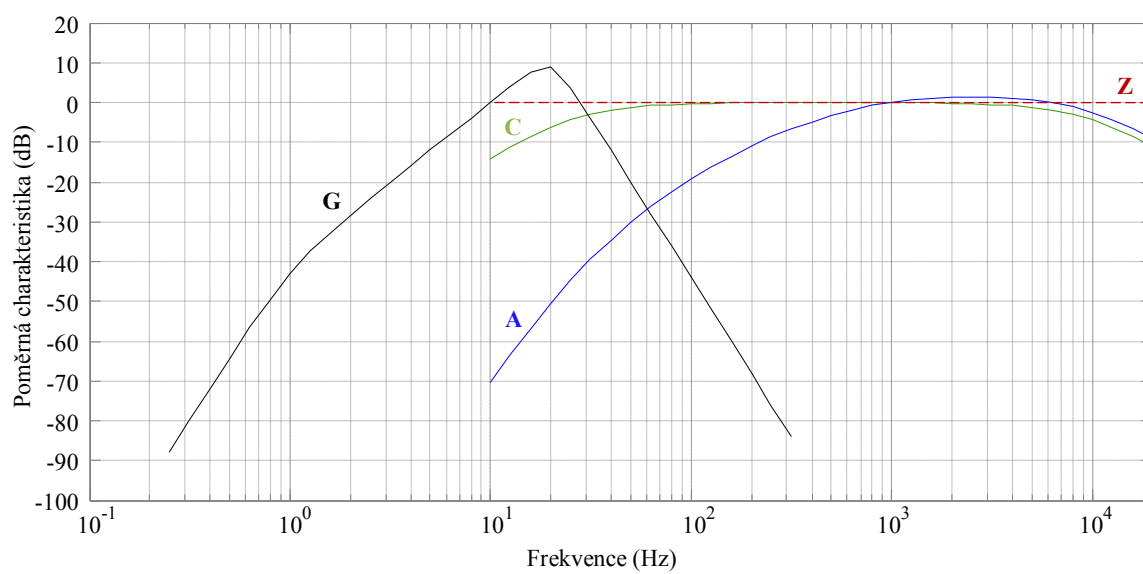
Příloha IV Vzhled vytvořeného grafického uživatelského rozhraní.

Příloha V Návod na použití programu.

Příloha VI Nastavené parametry filtrace.



Příloha I Kmitočtové váhové funkce A, C, Z (ČSN EN 61672-1 ed. 2) a G (ČSN ISO 7196).



Příloha II Příklady mikrofónů pro měření infrazvuků a nízkofrekvenčních zvuků.

**Tab. 4** Typy mikrofónů, které lze užít pro měření infrazvuků a nízkofrekvenčních zvuků.

Mikrofony pro měření infrazvuků a nízkofrekvenčních zvuků						
Výrobce	G.R.A.S	G.R.A.S	G.R.A.S	G.R.A.S	Brüel & Kjaer	Norsonic
Model	40 AZ	40 AN	40 EN	40 AQ	4193 (UC-0211) <sup>7</sup>	Nor1225
Velikost (průměr)	1/2"	1/2"	1"	1/2"	1/2"	1/2"
Citlivost (mV/Pa)	50	50	50	50	12,5	50
Frekvenční rozsah (Hz – kHz)	0,5–20 (±2 dB)	0,5–20 (±2 dB)	2,6–8	3,15–16	0,07–20	3,15–20 (±3 dB)
Dynamický rozsah (dB re. 20μPa)	14–146	14–146	9,6–146	16–148	19–162	15–146
Polarizační napětí (V)	0	200	200	0	200	200
Kapacita (pF)	20	20	56	13,3	18	18
Zvukové pole <sup>8</sup>	VP	VP	TP	DP	TP	VP
Provozní teplota (°C)	-40 až +120	-40 až +150	-40 až +150	-40 až +120	-30 až +300	max. 300
Typ předzesilovače <sup>9</sup>	26CG	26AH	26AK (RA0073) <sup>10</sup>	26CA	2669	Nor1209

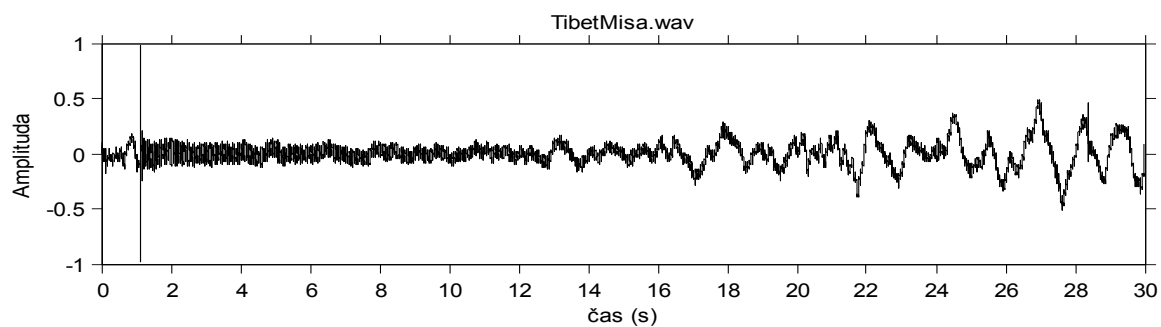
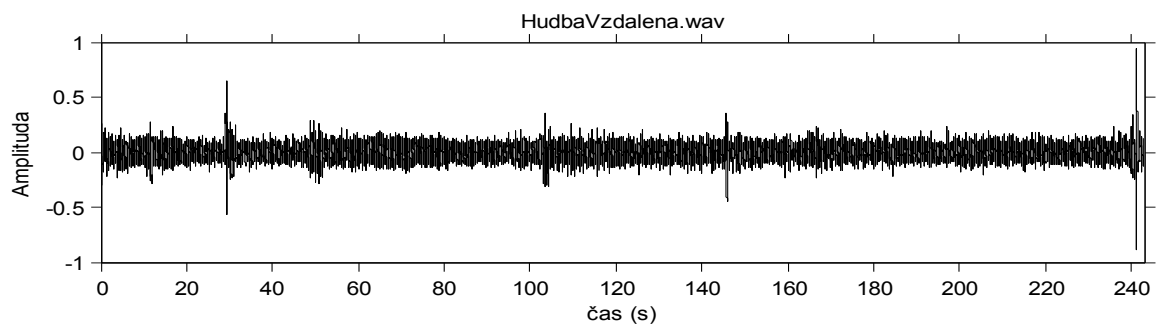
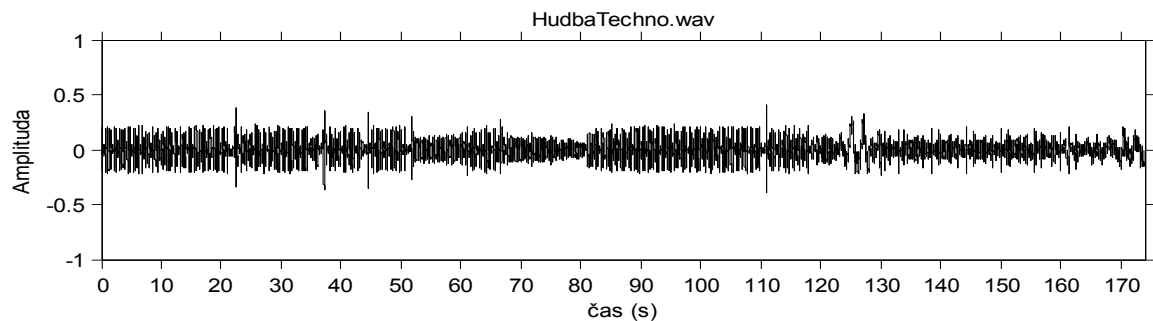
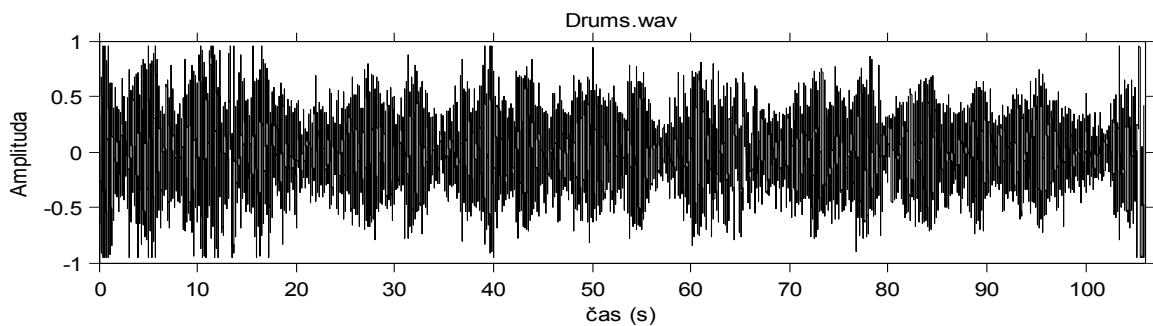
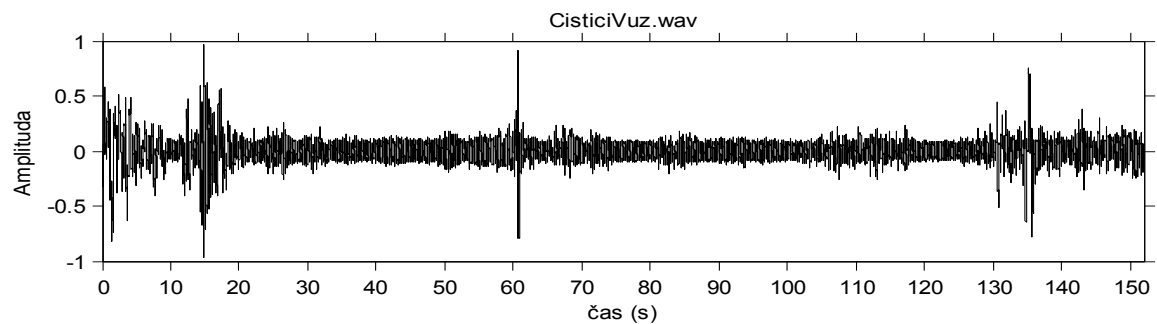
<sup>7</sup> Adaptor dodávaný pro infrazvuková měření.

<sup>8</sup> Zvukové pole: VP (volné pole), TP (tlakové pole), DF (difuzní pole).

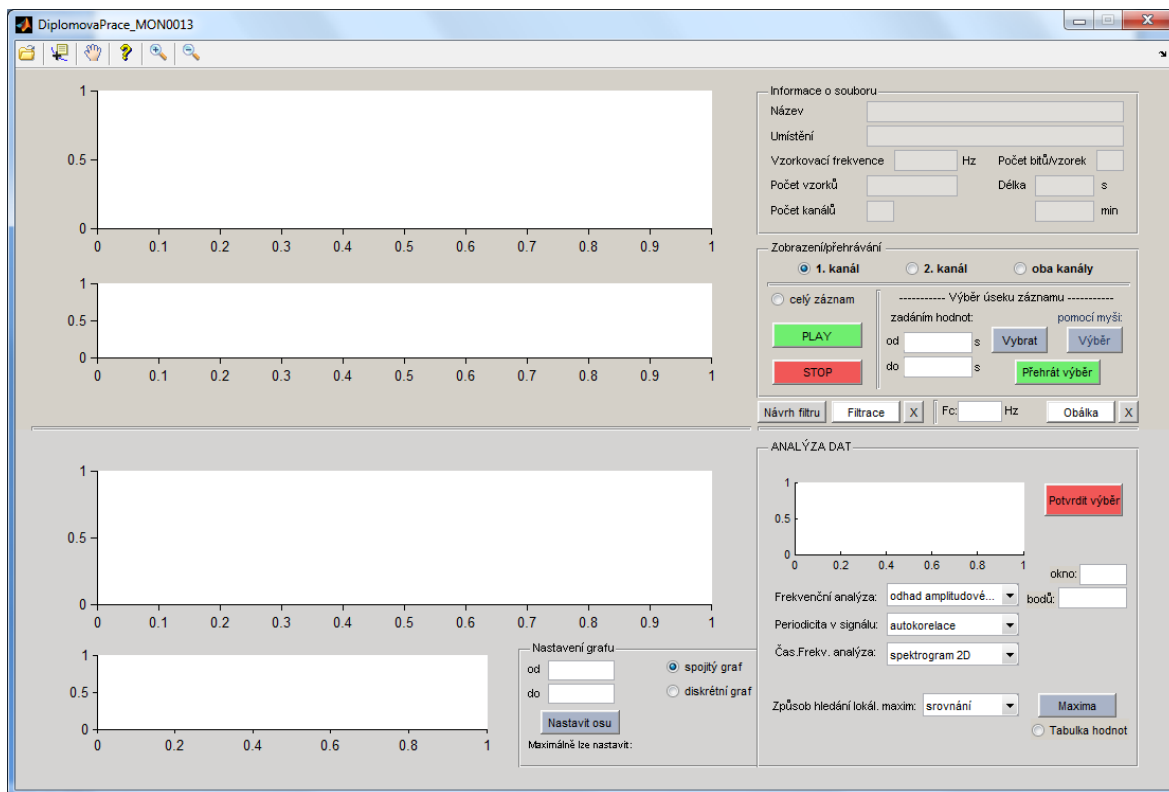
<sup>9</sup> Typ předzesilovače, který lze využít s daným mikrofónem (doporučen výrobcem).

<sup>10</sup> Adaptér zajišťující připojení 1" mikrofónu na 1/2" předzesilovač.

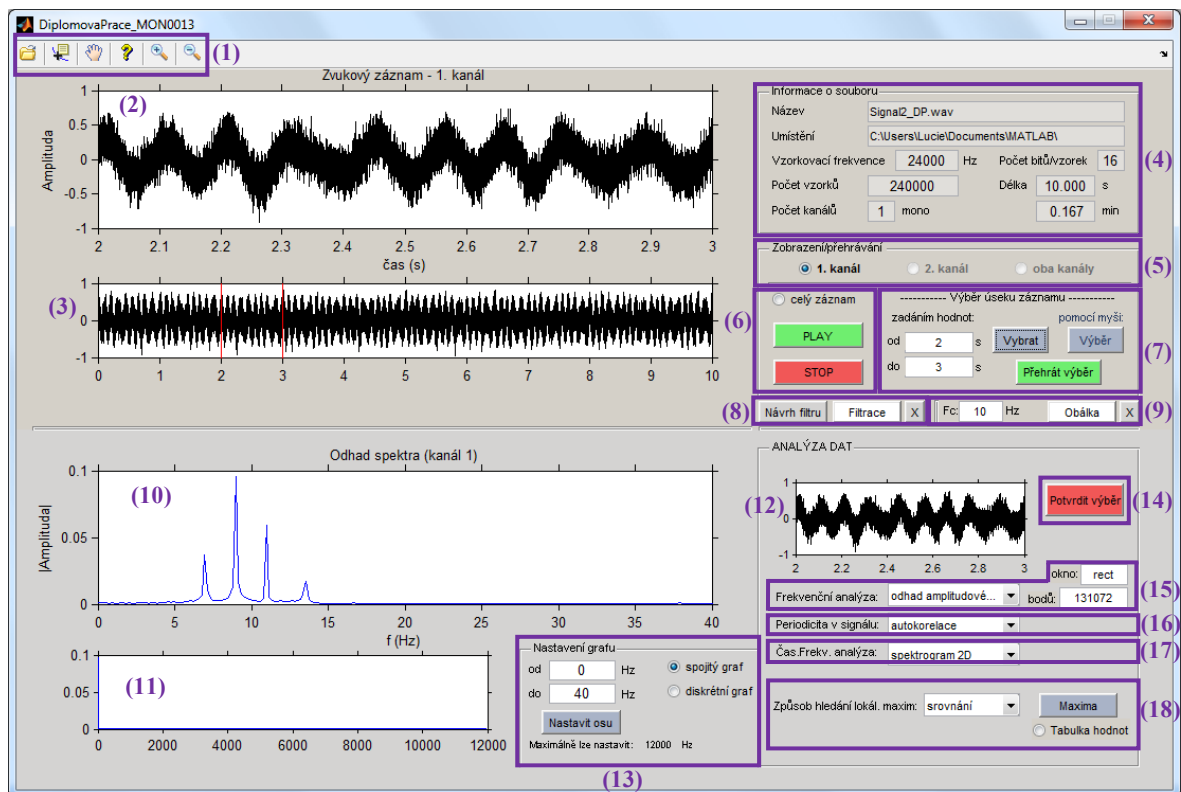
Příloha III Časové průběhy reálných zvukových záznamu.



Příloha IV Vzhled vytvořeného grafického uživatelského rozhraní.



## Příloha V Návod na použití programu.



Popis hlavního okna programu:

- (1) Panel nástrojů
- (2) Hlavní graf pro zobrazení celého záznamu nebo jeho úseku
- (3) Vedlejší graf pro zobrazení celého záznamu
- (4) Panel pro zobrazení základních údajů o načteném souboru
- (5) Panel pro volbu kanálu
- (6) Oblast pro zobrazení a přehrávání celého záznamu
- (7) Oblast pro zobrazení a přehrávání vybraného úseku záznamu
- (8) Tlačítka pro filtraci signálu
- (9) Tlačítka pro detekci obálky
- (10) Hlavní graf pro zobrazení výsledků analýzy v celém nebo zvoleném rozsahu
- (11) Vedlejší graf pro zobrazení výsledků analýzy v celém rozsahu
- (12) Malý graf zobrazující vybranou část záznamu k analýze
- (13) Oblast pro nastavení horizontální osy grafu (10)
- (14) Tlačítko pro potvrzení vybrané části záznamu k analýze
- (15) Výběr metod pro spektrální analýzu
- (16) Výběr metod pro zjištění výskytu periodicity v signálu
- (17) Výběr metod pro časově frekvenční analýzu
- (18) Oblast pro nastavení parametrů hledání lokálních maxim

#### Ad (1)



Zleva doprava:

1. Načtení souboru ve formátu wave.
2. Zobrazení souřadnic aktuálního umístění kurzoru (po kliknutí).
3. Nástroj ručička pro „uchopení“ zobrazeného signálu (pro posun)
4. Textová nápověda k programu
5. Zvětšení oblasti signálu
6. Zmenšení oblasti signálu

#### Ad (5)

V případě, že je audiozáznam stereofonní, je možnost zobrazení 1., 2. nebo obou kanálů volbou pomocí radiobuttonů (dále jen rb) s označením „1. kanál“, „2. kanál“ nebo „oba kanály“. U monofonních záznamů je automaticky znemožněna volba 2. kanálu nebo obou kanálů.

#### Ad (6)

Při výběru rb „celý signál“ je vykreslen v grafu (2) celý aktuálně načtený signál, který je možné pomocí tlačítka „PLAY“ přehrát. Při přehrávání změní tlačítko název na „Pause“ a je jím možné reprodukci nahrávky pozastavit a opětovným stiskem zase obnovit. Tlačítko „STOP“ pak slouží k úplnému zastavení nahrávky. Při opětovném stlačení „PLAY“ je přehrávání realizováno od začátku zvukové stopy. Během nahrávání je v grafu vykreslen vertikální ukazatel, který je synchronizován s přehráváním a pohybuje se v sekundovém intervalu. Nicméně při vysoké vzorkovací frekvenci daného záznamu a velkém počtu vzorků se může ukazatel výrazně zpožďovat.

#### Ad (7)

Výběr úseku záznamu je možné provést dvěma způsoby.

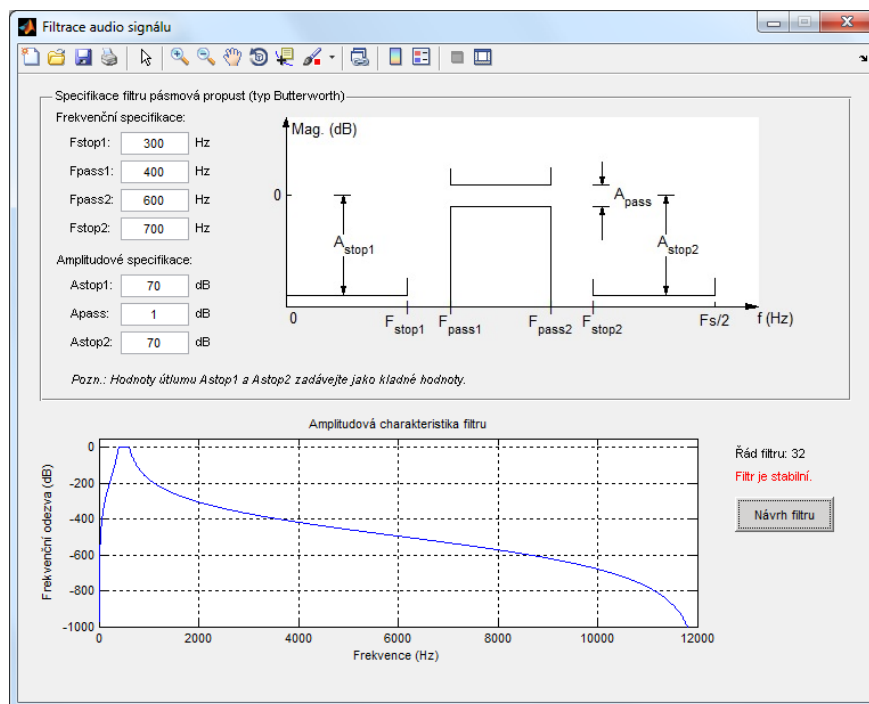
- 1) Zadáním konkrétních hodnot (v sekundách) do příslušných kolonek (edit textů) s označením „od“ a „do“ a potvrzením výběru tlačítkem s názvem „Vybrat“.
- 2) Stiskem tlačítka „Výběr“ a následným umístěním kurzoru do grafu (2) za stálého stisknutí levého tlačítka myši provést výběr dané oblasti. Po uvolnění tlačítka myši je vybraná oblast grafu (2) roztážena a vykreslena přes celý jeho rozsah.

Přehrávání výběru záznamu je realizováno tlačítkem „Přehrát výběr“. Během přehrávání výběru signálu není možnost pozastavení nebo zastavení reprodukce.

#### Ad (8)

Po kliknutí na tlačítko s názvem „Návrh filtru“ je zobrazeno nové okno, ve kterém je nutné nastavit hodnoty parametrů podle požadavků filtrace jejich vypsáním do příslušných edit textů. Typ filtru je pásmová propust s Butterworthovou aproximací frekvenční odezvy. Všechny zadávané hodnoty musí být kladné, včetně hodnot útlumu (v dB) při amplitudové specifikace filtru. Hodnoty frekvencí musí být větší než 0 Hz a menší než Nyquistova frekvence, tj. polovina vzorkovací frekvence. Amplitudová charakteristika navrženého filtru je zobrazena v grafu po stisku tlačítka v okně pro filtraci, taktéž nazvaného „Návrh filtru“. Nad zmiňovaným tlačítkem je vypsán řád

navrženého filtru a také ověřena jeho stabilita. Tlačítkem „*Filtrace*“ v původním okně je provedena filtrace dle zadaných specifikací filtru a vykreslen nový průběh signálu do grafu (2) a (3). Tlačítko označené „*X*“ slouží pro obnovu a vykreslení původního záznamu před filtrací.



#### Ad (9)

Do edit textu označeného jako „*Fc*“ je uživatelem zadána mezní frekvence dolnoproustného filtru s Butterworthovou aproximací. Pokud je návrh filtru stabilní, objeví se nalevo od tlačítka „Obálka“, písmeno „S“, v opačném případě pak písmeno „N“. Tlačítkem „Obálka“ je provedeno vykreslení horní části obálky do již vykresleného průběhu signálu v grafu (2). Tlačítko označené „*X*“ je určeno pro odstranění detekované obálky z grafu (2).

#### Ad (13)

Tento panel slouží k nastavení rozsahu grafu (10), resp. jeho horizontální osy pomocí edit textů „od“ a „do“. Maximální možná zadávaná hodnota je vypsána ve spodní části tohoto panelu. Nastavení grafu (10) na daný rozsah je provedeno stiskem tlačítka „Nastavit osu“. Prostřednictvím rb „spojitý graf“ a „diskrétní graf“ lze volit zobrazení výsledků analýzy ve formě spojitě linie nebo diskretních čar.

#### Ad (14)

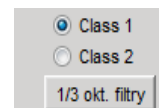
Tlačítko s názvem „Potvrdit výběr“, je nutné stisknout vždy při nově zvoleném úseku grafu (2), který má být analyzován. Pokud je výběr proveden správně, barva zvukového signálu vykresleného v grafu (12) se změní na červenou a nad grafem se vypíše text, že daný úsek kanálu byl vybrán.

#### Ad (15)

Pro frekvenční analýzu záznamu je možné zvolit některou ze čtyř naprogramovaných metod. První tři metody využívají pro výpočet algoritmus *FFT*, kde lze zvolit počet „bodů“ *FFT*. Počet bodů je

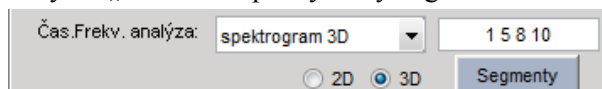
uživatelé zapisován do příslušné kolonky. V případě, že zadaná hodnota není rovna  $2^N$ , kde  $N$  je celé číslo, je počet bodů přepsán na nejbližší vyšší hodnotu  $2^N$ . Pokud není počet bodů specifikován, je automaticky nastaven na hodnotu 1024, což je  $2^{10}$ . Také lze zvolit typ váhové funkce, tzv. okno. Volba se provádí zadáním prvních čtyř písmen daného typu okna do odpovídajícího edit textu. Volit lze ze sedmi typů váhových funkcí – okno obdélníkové (rect), Hannovo (hann), Hammingovo (hamm), Blackmanovo (blac), Kaiserovo (kais), FlatTop (flat) a Bartlettovo (bart).

U 1/3 oktávové analýzy signálu lze volit ze dvou tříd filtrů, třídy 1 a třídy 2 („Class 1“ a „Class 2“), které se liší tolerančními mezemi zvlnění v propustném pásmu. Po stisku tlačítka s názvem „1/3 okt. filtry“ se zobrazí frekvenční odezva banky filtrů, tj. pásmových propustí.



### Ad (17)

Spektrogram 3D je kvůli výpočetní náročnosti naprogramován pro zobrazení frekvencí do 200 Hz, přičemž je příslušná hodnota PSD vypočtena pro celou délku trvání záznamu, tj. pro definovaný počet segmentů, který je závislý na časovém rozlišení spektrogramu. Do edit textu (viz obrázek) lze vypsát také konkrétní segmenty, které mají být zobrazeny, a následně je potvrdit tlačítkem „Segmenty“. Prostřednictvím volby rb „2D“ lze např. vybraný segment zobrazit v 2D rovině jako závislost PSD na frekvenci.

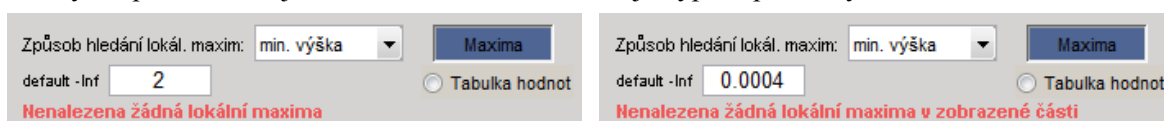


### Ad (18)

Tato oblast programu je určena pro vyhledání a zobrazení lokálních maxim grafických výsledků analýz zobrazených v grafu (10). Na výběr je z několika způsobů vyhledávání maxim.

1. „srovnání“: metoda založená na porovnávání velikosti každého prvku vektoru dat s jeho sousedními prvky. Jestliže je daný prvek větší než oba jeho sousedi, je vyhodnocen jako lokální maximum.
2. „práh“: lokální maxima jsou pouze vrcholy, které převyšují jejich sousedy o danou hodnotu.
3. „min. výška“: lokální maxima jsou pouze vrcholy, které převyšují danou hodnotu.
4. „min. vzdálenost“: lokální maxima jsou pouze vrcholy vzdálené od sebe o danou hodnotu.
5. „počet maxim“: nalezení počtu lokálních maxim určených danou hodnotou (od prvního maxima po danou hodnotu).

Po zvolení metody detekce lokálních maxim a následném stlačení tlačítka „Maxima“ dojde k vykreslení lokálních maxim do grafu (10). Uvolněním tlačítka jsou maxima z grafu odstraněna. Výběrem rb „Tabulka hodnot“ se zobrazí nové okno se dvěma tabulkami, přičemž v jedné jsou všechna nalezená lokální maxima a ve druhé aktuálně zobrazená maxima v grafu. Pokud, dle zadaných specifikací nejsou nalezena žádná maxima, je vypsán příslušný text.



Lokální maxima lze vykreslit pouze do spojitého grafu, tj. při označení rb „spojitý graf“.



Příloha VI Nastavené parametry filtrace.

Tabulka: Nastavení základní filtrace audiozáznamů.

Specifikace	Název souboru .wav				
	<i>CisticiVuz</i>	<i>Drums</i>	<i>HudbaTechno</i>	<i>HudbaVzdalena</i>	<i>TibetMisa</i>
<b>F_stop1</b> (Hz)	5	3	3	4	260
<b>F_pass1</b> (Hz)	6,3	6,2	6,2	6,4	350
<b>F_pass2</b> (Hz)	5000	5000	5000	8000	10 000
<b>F_stop2</b> (Hz)	8000	8000	8000	10 000	12 000
<b>A_stop1</b> (dB)	90	70	70	90	90
<b>A_pass</b> (dB)	1	1	1	1	1
<b>A_stop2</b> (dB)	90	70	70	90	90

Tabulka: Nastavení další filtrace audiozáznamů.

Specifikace	Název souboru .wav							
	<i>CisticiVuz</i>		<i>Drums</i>		<i>TibetMisa</i>			
	<i>10 Hz</i>	<i>35 Hz</i>	<i>basy</i>	<i>řeč</i>	<i>415 Hz</i>	<i>1190 Hz</i>	<i>2220 Hz</i>	<i>3440 Hz</i>
<b>F_stop1</b> (Hz)	5	20	3	55	250	800	1900	3000
<b>F_pass1</b> (Hz)	6,2	25	6,3	90	300	900	2000	3200
<b>F_pass2</b> (Hz)	15	40	200	5000	500	1500	2500	3700
<b>F_stop2</b> (Hz)	20	50	350	8000	550	1700	2800	4000
<b>A_stop1</b> (dB)	90	90	70	70	90	90	90	90
<b>A_pass</b> (dB)	1	1	1	1	1	1	1	1
<b>A_stop2</b> (dB)	90	90	70	70	90	90	90	90

*Poznámka:* Hodnoty uvedené pod názvy záznamů představují přibližnou centrální frekvenci zájmové oblasti, která má být propuštěna; údaje „basy“ a „řeč“ pak reprezentují slovní popis typu zvuku, který má být zdůrazněn.